

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН



Пр-2161

А. К. Кузьмин

**ДИСТАНЦИОННАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ
ДИАГНОСТИКА ХАРАКТЕРИСТИК АВРОРАЛЬНОЙ
ИОНОСФЕРЫ С ОРБИТ ЗАРУБЕЖНЫХ
И ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОССИЙСКИХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Представлено к печати
директором ИКИ РАН
Л. М. Зеленым

**МОСКВА
2011**

Remote sensing spectrophotometric diagnostics of auroral ionosphere characteristics from the orbit of perspective Russian spacecrafts

A. K. Kuzmin

Space Research Institute (IKI RAN)

Possibilities of both local and global observations of auroral intensity distribution from the spacecraft orbits are considered. Concrete emissions whose intensity are expedient for calculation of charge particles energetic characteristics are chosen. Both some elements of experimental-modeled technique of ionosphere remote sensing diagnostics and problems attendant its realization are discussed. Examples of auroral images from the orbits and another data obtained in different geomagnetic conditions are analyzed. The recent and near future planning foreign auroral imaging orbital experiments are surveyed. The principal preliminary characteristics of Russian onboard designing auroral imagers both visible and VUV are presented.

Keywords: auroral emissions, remote sensing observation from orbit, auroral imagers for satellite, precipitating charge particles, energetic characteristics of ionosphere, altitude integrated conductance.

Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит зарубежных и перспективных российских космических аппаратов

А. К. Кузьмин

Учреждение Российской академии наук
Институт космических исследований РАН

Рассматриваются возможности как локальных, так и глобальных наблюдений распределений интенсивности авроральных эмиссий с орбит КА. Проводится обоснованный выбор конкретных эмиссий, свойства которых можно использовать для дистанционного определения энергетических характеристик высыпающихся заряженных частиц. Обсуждаются некоторые элементы экспериментально-модельной методики спектрофотометрической ионосферной диагностики с орбиты и проблемы, сопутствующие ее реализации. Рассматриваются примеры полученных с разных орбит авроральных изображений и других данных в различных геомагнитных условиях и проводится краткий обзор недавних и планируемых зарубежных бортовых орбитальных экспериментов. Представляются основные предварительные характеристики создаваемых новых бортовых отечественных широкоугольных монохроматических изображающих приборов (на основе современных CCD-детекторов и цифровых электронных технологий) для измерений как в видимой области спектра, так и в области вакуумного ультрафиолета.

Ключевые слова: авроральные эмиссии, дистанционные наблюдения с орбиты, бортовые монохроматические изображающие приборы, высыпающиеся заряженные частицы, энергетические характеристики ионосферы, проводимости интегрированные по высоте.

Кузьмин Александр Константинович — главный специалист, кандидат физико-математических наук, E-mail: alkkuzmin@mail.ru.

Иллюстрации даны в авторской редакции

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	4
Введение	5
1. Цель работы.	5
2. Элементы методики	7
3. Выбор эмиссий и элементы технологии анализа бортовых изображений	12
4. Эмпирическая связь энергетических характеристик заряженных частиц и проводимостей ионосферы	21
5. Обзор перспективных зарубежных проектов по авроральной дистанционной диагностике с орбиты.	23
6. Предварительные основные характеристики экспериментов на перспективных российских КА.	24
7. Прикладные задачи дистанционной диагностики.	27
8. Возможности использования томографических методов для анализа орбитальных авроральных изображений	28

Список сокращений

ВУФ	— вакуумный ультрафиолет
КА	— космический аппарат
МГГ	— международный геофизический год
ММП	— межпланетное магнитное поле
НЦ ОМЗ	— «Научный центр оперативного мониторинга Земли» филиал ФГУП «Центр космических наблюдений»
ТГУ	— Томский государственный университет
ЦАО	— Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета
AKR	— Auroral Kilometric Radiation
ALIS	— Auroral Large Imaging System (Скандинавская меридиональная цепочка монохроматических камер всего неба)
AMIE	— Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics
DMSP	— Defence Meteorological Satellite Program
CCD	— charge couple device
CIT	— computerized ionospheric tomography
EIC	— electrostatic ion cyclotron waves
EMIC	— electromagnetic ion cyclotron waves
ELF	— Extremely Low Frequency
e-POP	— Enhanced Polar Outflow Probe
ESW	— 3D electron solitary waves
FAC	— Field Aligned Current
FAI	— Fast Auroral Imager (e-POP satellite)
FAST	— Fast Auroral Snapshot satellite
f. p.	— foot point or foot print
FUVSI	— FUV Spectrographic Imager (in KuaFu project)
GGIPCW	— Global Geospace Imaging on Polar Climate and Weather
HAARP	— High Frequency active Auroral Research Program
HF	— High Frequency
IGRF	— International Geomagnetic Reference Field
ILWS	— International Living With a Star Program
IMAGE	— Imager for Magnetospheric-to-Aurora Global Exploration
KuaFu	— перспективный китайский космический проект
L	— параметр Мак-Илвайна
LBH	— Lyman Birdge Hopfield spectral bands
LHSS	— Low Hybrid Solitary Structures
MAC	— Multispectral Auroral Camera (REIMEI satellite)
MLT	— Magnetic Local Time
MOXI	— Molniya X-ray Imager
MUVI	— Molniya Ultraviolet Imager
OSIRIS	— Optical Spectrograph and Infra-Red Imaging System
PCW	— Polar Communications and Weather (перспективный канадский высокоапогейный КА)
PHEMOS	— Polar Highly Elliptical/Molniya Orbit Science Payload
RAVENS	— Recurrent Auroral Visualization of Extended Northern
REIMEI	— Japan satellite
SI	— Spectrographic Imager (IMAGE spacecraft)
SuperDARN	— Super Dual Auroral Radar Network
THEMIS	— Time History of Events and Macroscale Interaction during Substorms
UH	— Upper Hybrid waves
UVAMC	— FUV Auroral Monitoring Cameras (in KuaFu project)
UVI	— Ultraviolet Imager (Polar spacecraft)
VLF	— Very Low Frequency
WIC	— Wide-angle Imaging Camera (IMAGE spacecraft)
WFAI	— Wide Angle Auroral Imager in X-ray (in KuaFu project)

Введение

Геофизики все больше открывают возможности использования природного магнитосферно-ионосферного «телевидения», которое жители приполярных областей уже много веков наблюдают в виде сполохов полярного сияния на небосводе, а космонавты, смотря в иллюминатор, фотографируют и зарисовывают завораживающие авроральные картины во время мощных геомагнитных бурь*, в целях дистанционных глобальных и локальных измерений ионосферных характеристик. На рис. 1 (см. с. 36) представлена страница из бортового журнала, на которой пилот орбитальной станции «Салют-6» Ю. Романенко изобразил цветными фломастерами наблюдаемую им в иллюминатор картину полярного сияния в районе апекса орбиты над Канадой 7 февраля 1978 г. [1]. Если с поверхности Земли полярные сияния довольно часто не видны из-за неблагоприятных погодных условий, то с орбиты с полярным наклоном ее плоскости к плоскости экватора аврора видна практически всегда. Еще со времен МГГ известно, что даже после месяца спокойных геомагнитных условий, что бывает крайне редко, отмечаются высыпания заряженных частиц из плазменного слоя магнитосферы, а соответственно существует результат этих высыпаний в ионосфере (диффузный низкоинтенсивный авроральный овал, имеющий относительно небольшие размеры).

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель настоящей работы — рассмотреть (на конкретных примерах экспериментальных и модельных результатов) специфику методической стороны дистанционной диагностики энергетических характеристик и процессов в полярной ионосфере на основе орбитальных и координированных наземных спектрофотометрических измерений распределений интенсивности и анализа монохроматических изображений конкретных эмиссий ионосферы и верхней атмосферы. Свойства авроральных эмиссий и методические трудности измерений их интенсивности в предшествующих зарубежных и российских спектрофотометрических экспериментах обсуждаются в контексте постановки экспериментов на планируемых к запуску конкретных российских околоземных космических аппаратах (далее КА). Эти КА, оснащенные изображающими приборами (монохроматическими имаджерами) и другими диагностическими приборами гелио-геофизического комплекса, как предполагается, будут работать в близкие периоды времени — 2015–2020 гг. и даже одновременно как на высокоапогейной полярной эллиптической орбите, так и на низкоапогейных круговых полярных орбитах.

* В связи с наклоном плоскости орбиты пилотируемых станций к плоскости экватора ($\sim 51^\circ$) полярные сияния наиболее часто могут наблюдаться в апексах орбиты на долготях Канады и Австралии из-за отклонения геомагнитного диполя от оси вращения.

Использование возможностей, возникающих при системном планировании, координации управления и синхронизации измерений с орбит двух/трех КА одновременно и наземных обсерваторий, основанные на ситуационном анализе взаимного расположения КА в пространстве, позволит расширить набор условий для проведения экспериментов и, в конечном счете, позволят увеличить эффективность всех измерений.

Первые элементы методики спектрофотометрической дистанционной диагностики характеристик ионосферы с орбиты были заложены еще в 60-е гг. 20-го столетия по результатам пионерских экспериментов на околоземных спутниках первого поколения, данных наземных авроральных наблюдений и первых модельных расчетов. В 80-х гг. прошлого века автору удалось частично реализовать их в экспериментах с фотометрами, имеющими узкое поле зрения и построенными с использованием фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) для регистрации квантов. Эти авроральные фотометры работали на орбитах советских ИСЗ «Ореол-3» (проект АРКАД-3) и «ИК-Болгария-1300» в 1981–1982 гг. Примеры результатов измерений в этих экспериментах приведены на рисунках в работе [2], а основы развиваемой методики, согласно которой, анализируя полученные с орбиты монохроматические авроральные изображения, можно оценивать распределения энергетических и электродинамических характеристик полярной ионосферы, рассмотрены в [3]. В июле 1987 г. в южном апексе орбиты орбитальной станции «Мир» (в районе Австралии) во время суббури с помощью конфокального интерферометра Фабри-Перо удалось измерить авроральный доплеровский контур красной кислородной линии и определить температуру кислородных атомов в полярном сиянии [4].

За рубежом эксперименты по дистанционной диагностике характеристик авроральной ионосферы проводились с начала космической эры и особенно широко — последние 15 лет (см. [5–21, 23–26, 28–31, 33, 34, 36–60, 62–73]). В связи с этим в обзоре иллюстративный материал представлен на языке оригинала.

За прошедший с тех пор период понимание значительной части физических процессов взаимодействия магнитосферы и ионосферы улучшилось, но количество вопросов не уменьшилось, и для ответа на них необходимо проведение дальнейших исследований как теоретических, так и экспериментальных. Например, каким образом электроны и ионы, производящие дискретные структуры аврорального свечения, увеличивают свою энергию? Как они взаимодействуют с волнами? Как и на какой высоте образуются градиенты продольного потенциала и продольного электрического поля? Как они связаны с продольными токами и механизмом обратной связи в нижней ионосфере? Взаимодействуют ли дуги разных масштабов между собой? Как образуются пульсирующие формы в лучевых структурах и в полярной шапке? Какова тонкая структура диффузной авроры? и др. Исследования механизмов ускорения заряженных частиц, их связь с локальными структурами потенциала и разнонаправленными токами были одной из ключевых задач при проведении ряда орбитальных проектов, таких как: DE, Viking, FREJA, POLAR, TIMED, INTERBALL, CLUSTER, FAST, IMAGE, REIMEI (INDEX), THEMIS (см. ссылки в [5], а также [6–8]). Хотя методики бортовых экспериментов в этих проектах и полученные благодаря им результаты позволили проверить многие теоретически обоснованные смоделированные фи-

зические условия, механизмы развития ряда плазменных процессов в околоземном пространстве остаются до конца не проясненными из-за своей сложности и многообразия.

Спектрофотометрический дистанционный метод исследований и диагностики ионосферных процессов развивается наряду с методиками исследований плазменных характеристик непосредственно в окрестности КА (измерения распределений заряженных частиц, градиентов магнитного и электрического поля, волновые измерения в широком диапазоне частот). Развитие новых экспериментальных технологий на базе изображающих высокочувствительных CCD-детекторов, оптических и информационных достижений в последние два десятилетия позволяет существенно увеличить углы полей зрения приборов и принципиально улучшить пространственное разрешение спектрофотометрических измерений как с поверхности Земли, так и с орбиты. Благодаря тому, что верхняя атмосфера и ионосфера (со всеми своими составляющими) природой вписаны, как экран, в магнитно-электрический генератор системы магнитосфера-ионосфера-термосфера, в его объеме теряют свою энергию высыпавшиеся заряженные частицы, замыкаются продольные токи и отображаются в виде свечения эмиссионных процессов, происходящих как в магнитосфере, так и ниже (в тропосфере и даже в глубине Земли). Научиться эффективно пользоваться свойствами этого природного ионосферно-атмосферного слоя свечения для анализа процессов, происходящих в околоземной среде, — наша задача при проведении перспективных орбитальных авроральных монохроматических изображающих экспериментов.

2. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ

Восстановление энергетических характеристик высыпавшихся заряженных частиц по интенсивности эмиссий, излучаемых составляющими верхней атмосферы и ионосферы, в математическом аспекте относится к постановке и решению обратной задачи. Оценки потока энергии и средней энергии электронов и ионов по распределениям интенсивности возбужденных ими эмиссий проводятся с помощью полуэмпирических моделей. Угол поля зрения современных монохроматических изображающих приборов обеспечивает попадание проекции геомагнитной силовой линии, на которой в момент экспозиции находится КА, в поле зрения имаджера, если его оптическая ось направлена в нади́р. Это принципиально важное условие для наблюдений позволяет построить экспериментально-модельную методику дистанционной диагностики с орбиты энергетических характеристик полярной ионосферы. Суть ее заключается в следующем.

2.1. На основе данных измерений энерго-угловых распределений потоков электронов и протонов в конкретной точке орбиты КА рассчитываются их поток энергии и средняя энергия. Эти распределения вводятся в модель транспорта заряженных частиц (см., например, [9–17]). Проводится анализ процессов потерь энергии частиц (при упругих и неупругих столкновениях) на ионизацию, перезарядку и возбуждение атомов, молекул и ионов верхней атмосферы с учетом

фотохимических реакций и на основе современных данных поперечных сечений (см., например, [71]), при этом рассчитывается дальнейшая судьба (до конкретных выбранных высот) каждой энергичной частицы и ее вторичной электронной продукции. Результаты расчета интенсивностей эмиссий и их отношений фиксируются на конкретных заданных высотах. *Модели транспорта электронов и ионов в магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере развиваются по различным методическим путям: аналитически, по методу Монте-Карло и гибридным. Также активно развиваются модели, включающие процессы взаимодействия волна-частица, самосогласованное продольное электрическое поле и различные типы турбулентности* (см. [18] и ссылки в ней).

2.2. Силовая линия магнитного поля, при пересечении которой были получены энерго-угловые распределения потоков высыпающихся частиц, трассируется до конкретных высот максимумов интенсивности конкретных выбранных эмиссий. В каждом из этих изображений определяется номер элемента изображения (пиксела) в матрице CCD соответствующего канала, через который прошла проекция магнитной силовой линии на конкретной высоте в ионосфере (foot point, далее f. p.), на которой в момент экспозиции изображения находился КА и измерялись распределения заряженных частиц. После проведения всех коррекций изображений, рассматриваемых в п. 3.2 и 3.3, определяются истинные интенсивности эмиссий (в соответствии с предполетной абсолютной калибровкой имаджера), зарегистрированные в пикселах в момент экспозиции изображений. По этим данным рассчитываются параметры: поток энергии и средняя энергия частиц F_e , F_p , E_{cp} . По результатам сравнения параметров, измеренных в окрестности КА и рассчитанных по распределениям интенсивностей, проводится определение «модельно-калибровочных» коэффициентов корреляции, которые зависят от конкретной модели транспорта частиц, поперечных сечений взаимодействия и еще ряда параметров. Эти коэффициенты могут быть использованы для уточнения решения обратной задачи (в условиях предположения, что наблюдаемые авроральные структуры стационарны в пределах времени экспозиции изображений, табл. 1, см. с. 35), т. е. для определения потока энергии и средней энергии первичных высыпающихся заряженных частиц по измеренным величинам интенсивности эмиссий в других пикселах, через которые прошли проекции других магнитных силовых линий, но которые КА не пересекал в момент экспозиции изображений эмиссий.

В качестве примера, свидетельствующего о методических погрешностях, возникающих при проведении экспериментально-модельного анализа дистанционных данных (в первом приближении), которые нельзя недооценивать, стоит обратить внимание на координированный эксперимент (результаты рассмотрены в работе [19]). В эксперименте анализировались одновременные измерения с трех КА (Themis-E, Themis-D и REIMEI), двух наземных оптических станций (Inuvik и Fort Yukon) в северной Америке и цепочки магнитометрических станций, расположенных в авроральной зоне. По данным приборов КА Themis в магнитосфере 28 января 2008 г. после 10:55 UT начала развиваться суббурия. Спутник REIMEI пересек авроральный овал в секторе 00.50 LT и пролетел в 10:58:12–10:58:26 UT на высоте 640 км над зоной охвата all-sky камеры станции

Inuvik. По данным этой камеры всего неба в этом интервале времени наблюдались две дуги, которые двигались со скоростью 3...8 км/с. На борту КА REIMEI проводились измерения энерго-угловых распределений потоков энергичных заряженных частиц в диапазоне от 0,1 до 12 кэВ (один спектр за 40 мс, одна энергетическая ступень за 1,25 мс) и дистанционные монохроматические измерения распределений интенсивности трех эмиссий (имаджер МАС) в угле поля зрения $7,6 \times 7,6^\circ$. Несколько экспериментальных причин (f. p. оказалась в поле изображения только через 10 с после пересечения авроральной дуги космическим аппаратом, так как угол поля зрения имаджера МАС составлял $2\omega \approx 7,6^\circ$) и не достаточно корректный анализ изображения (в частности, не были проведены коррекции изображений эмиссий на отражение от подстилающей поверхности, не была сделана коррекция на фон отраженного от подстилающей поверхности лунного света) привели к тому, что широтные профили интенсивности эмиссии $\lambda 427,8$ нм, полученные из изображения авроральной дуги, и рассчитанные профили с использованием модели транспорта электронов и измеренных электронных спектров, отличаются в несколько раз, что в конечном счете привело к ошибкам в расчете потока энергии электронов.

2.3. Точность определения энергетических характеристик возрастет, когда измерения распределений заряженных частиц на разных высотах и локальное картографирование монохроматических изображений эмиссий в неосвещенной окрестности одной и той же магнитной силовой линии (далее м.с.л.) с $L \geq 5$ одновременно проводятся с орбит двух независимых низкоапогейных КА. В такой ситуации фактически создаются условия для измерений в объеме магнитной силовой трубки ниже области ускорения.

Возможна и другая ситуация, когда окрестность одной и той же м.с.л. пересекают два КА, один из которых будет находиться в апогее на высотах более 20 000 км, а второй — на высотах менее 1000 км. На обоих КА проводятся измерения энергоугловых распределений электронов и протонов, а также получают монохроматические изображения авроры. Причем с орбиты высокоапогейного КА авроральной овал картографируется в ВУФ-диапазоне спектра целиком, а с орбиты низкоапогейного КА получают локальные «видимые» изображения той части овала, в которой находится проекция м.с.л. той самой, на которой в момент экспозиции изображений находится «высокий» КА. Геометрия наблюдений в подобной ситуации смоделирована и показана на рис. 2 (см. с. 37), где два проектируемых в настоящее время КА (КА «Электро-ВО» на высоте 40 000 км и КА «Метеор-МП» на высоте 830 км) одновременно пересекают окрестность одной и той же магнитной силовой линии (характеристики авроральных изображающих приборов и орбит перспективных российских КА рассматриваются в разд. 6 данной работы и сконцентрированы в табл. 1, см. с. 35). В этой ситуации ВУФ-изображения всего аврорального овала с высокоапогейного КА позволяют идентифицировать мгновенные естественные границы авроры как по электронам, так и по протонам (см. далее) с пространственным разрешением ~ 12 км (с высоты апогея) и временным разрешением в несколько десятков секунд. Локальные монохроматические изображения авроры в эмиссиях видимого спектра, получаемые с низкоапогейного КА, в настоящее время могут иметь пространственное

разрешение до нескольких сотен метров и временное — до нескольких долей секунды. В этих изображениях фиксируются авроральные структуры соответствующих масштабов, которые показаны в табл. 2 и на рис. 3а (см. с. 38). На рис. 2 (см. с. 37) можно видеть и третий КА — «Зонд» — ($H \approx 650$ км), не находящийся в окрестности магнитной силовой линии, которую пересекают КА «Электро-ВО» и КА «Метеор-МП». При этом в поле зрения имаджера на КА «Зонд» попадает та же самая локальная область ночного аврорального овала, которая в этот момент находится в поле зрения имаджера на КА «Метеор-МП». Описанная ситуация взаимного положения космических аппаратов и геометрия спектрофотометрических наблюдений с их орбит вполне реальны примерно раз в несколько суток с разной степенью приближения [2]. Методика ситуационного анализа положения КА на различных орбитах при долгосрочном планировании экспериментов с целью повышения их эффективности представлена в работе [21].

На промежуточных высотах между орбитами КА «Электро-ВО» и КА «Метеор-МП» может происходить ускорение заряженных частиц, связанное с рядом токовых и плазменных процессов (рис. 4, см. с. 39). В колонках на рис. 4а (см. с. 39) (адаптирован из [22]) представлены возможные варианты и ключевые характеристики токовых систем в полярной ионосфере: система токов вниз, система токов вверх и система альвеновских токов в противоположных направлениях. Заметим, что использование в этом случае экспериментально-модельной методики восстановления энергетических характеристик заряженных частиц по авроральным изображениям до высот КА «Метеор-МП» и далее до высот КА «Электро-ВО» и сравнение с характеристиками, рассчитанными по прямым измерениям распределений заряженных частиц и градиентов магнитного и электрического поля в окрестности каждого КА, позволит получить граничные условия для анализа процессов, происходящих в силовой трубке между мгновенными высотами этих КА.

2.4. В области продольного тока вверх на высотах между 1-м и 2-м радиусами Земли R_E в определенных условиях образуются отрицательные потенциальные структуры, связанные со сходящимися электрическими полями [23] (см. рис. 4б, с. 39). Когда движущиеся в сторону Земли электроны проходят сквозь такие структуры падений потенциала, у них возрастает энергия, что приводит к их более глубокому проникновению в атмосферу и к интенсификации авроры.

Внизу рис. 4б (см. с. 39), адаптированного из [22], представлено ВУФ-изображение аврорального овала, полученное с КА Polar (имаджер UVI, полоса фильтра LBH1). На это изображение нанесен спроецированный по магнитному полю до высоты изображения соответствующий участок орбиты КА FAST, т. е. траектория подножной точки (f. p.), в интервале, когда FAST пересекал ночной авроральный овал на высоте ~ 3500 км. На панели а спектрограммы на рис. 4б (см. с. 39) приведены возмущения магнитного поля относительно модельного поля IGRF с областями продольных токов, выделенными разными цветами. Область токов, направленных вниз, окрашена зеленым цветом, токов вверх — сиреневым, а область альвеновских разнонаправленных токов — красным. На панели б приведены флуктуации электрического поля, которые иллюстрируют электростатические скачки, связанные с авроральными областями ускорения

заряженных частиц; на панелях *c* и *d* (соответственно) — спектрограмма и питч-угловое распределение электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 10 кэВ; на панелях *e* и *f* (соответственно) — спектрограмма и питч-угловое распределение ионов в том же диапазоне энергий. Интегральный поток ионов с энергиями более 20 эВ приведен на панели *g*; панели *h* и *i* иллюстрируют волновую активность в диапазоне частот от DC до мегагерц. Высота КА FAST, инвариантная широта и геомагнитное местное время на данном участке орбиты с минутным интервалом даны под панелью *i*.

В токовой области вниз потенциальные структуры противоположной полярности с расходящимися электрическими полями и направленным вниз вектором электрического поля образуются на высотах между 1000 и 4000 км (см. рис. 4, с. 39), ускоряя электроны от Земли. Характеристики токовой области вниз и двойственность противоположных ветвей авроральных токов обсуждались в ряде работ (см. статью [24]) на основе наблюдений с КА FREJA, CLUSTER и FAST.

С полярной стороны аврорального овала (см. спектрограммы рис. 4б, с. 39) наблюдается ускорение заряженных частиц инерциальными или кинетическими альвеновскими волнами, которое играет решающую, а иногда преобладающую роль для определенных типов авроры [25, 26]. Область этого ускорения на рис. 4б (см. с. 39) помечена красным цветом.

Разные типы взаимодействия волна-частица и турбулентности отмечаются как в области тока вниз, так и в области тока вверх (см. монографию [22] и работу [18]). В токовой области вниз имеются два типа действующих турбулентностей: управляемая током ионно-циклотронная и электростатическая солитерно-волновая [18].

Картографирование монохроматических изображений мелкомасштабных авроральных фрагментов, которые отображают вышеперечисленные процессы в пространстве между ионосферой и магнитосферой и имеют размеры в несколько сотен метров и даже менее (см. рис. 3а, с. 38), в настоящее время вполне реально с высот орбит перспективных низкоапогейных российских КА (см. рис. 2, с. 37; 15, с. 46; 17, с. 47; характеристики приборов см. в табл. 1, с. 35). Это стало возможным как благодаря развитию CCD-детекторов изображений, так и новым технологиям, которые начали использоваться в информационных интерфейсах на космических аппаратах.

3. ВЫБОР ЭМИССИЙ И ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА БОРТОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Так как суть дистанционной методики заключается в том, чтобы по отклику возбуждаемых компонент верхней атмосферы на высыпания заряженных частиц (т. е. по данным измерений интенсивности эмиссий) определять распределения их энергетических характеристик, важен выбор конкретных эмиссий, которые позволят сделать оценки более эффективными.

3.1. Выбор конкретных эмиссий для дистанционных измерений ионосферных характеристик (из множества присутствующих в спектре свечения атмосферы

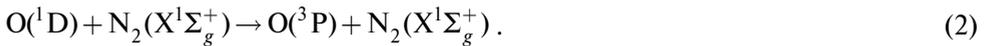
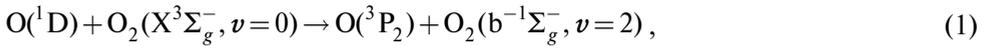
и ионосферы) основывается на следующей логике. Эмиссии одного типа являются прямыми индикаторами потока энергии, приносимой в ионосферу высыпаящимися из магнитосферы заряженными частицами. Максимум интенсивности этих эмиссий имеет довольно малую (~30...40 км) протяженность по высоте даже в диффузной авроре (см. [27]). Атомы, молекулы и их ионы, возбужденные ударом электрона на более высокий уровень, возвращаются к основному состоянию за доли секунды. К таким эмиссиям относятся, например, линии первой отрицательной системы иона молекулы азота $1NG(N_2^+)$, время жизни возбужденного уровня которой составляет несколько десятков наносекунд, а высота максимума интенсивности излучающего слоя ~100...140 км. Протонно-водородная ударная ионизация N_2 также дает свой вклад в возбуждение первой отрицательной системы, причем возбуждение от их вторичной электронной продукции соизмеримо с вкладом от протонов непосредственно [28]. На рис. 5б (см. с. 40), адаптированном из [9], представлена зависимость интенсивности линии $\lambda 427,8$ нм $1NG(N_2^+)$ от потока энергии электронов. В работе [72] было выведено соотношение между интенсивностью этой линии и потоком энергии заряженных частиц (суммарный поток энергии от электронов и протонов): $0,29 \pm 0,08$ кР/(эрг/см²с).

Эмиссии другого типа излучаются составляющими, находящимися в возбужденном (метастабильном) состоянии. Время жизни этих состояний может быть довольно большим (от нескольких секунд до сотен секунд). Протяженность максимума интенсивности эмиссий, излучаемых при переходе в основное состояние, по высоте относительно велика и может достигать до сотни километров. Поэтому распределения их интенсивности отражают механизмы не только возбуждения, но и гашения и потерь энергии вторичной электронной продукцией, образующейся после столкновений энергичных электронов и протонов с нейтральными составляющими верхней атмосферы, продолжающей двигаться вглубь атмосферы вдоль магнитного поля. Характерным примером такого свечения является красная эмиссия (триплет атомарного кислорода $\lambda 630,0$ - $636,4$ - $639,2$ нм), излучаемая с уровня $O(^1D)$. Этот триплет является запрещенным для электрического дипольного излучения и поэтому его линии излучаются в основном за счет магнитодипольного механизма, в котором переходы происходят только между уровнями одной и той же электронной конфигурации и число J может меняться на ± 1 или 0. В электронной авроре атом кислорода может возбуждаться как ударом электрона, имеющим энергию ≥ 2 эВ, так и в реакциях диссоциативной рекомбинации O_2 .

В протонной авроре (по результатам модельных расчетов в [28]) только ~1 % атомов кислорода возбуждается до уровня $O(^1D)$ за счет столкновений с энергичными атомами водорода, образующимися при реакции перезарядки с протонами (см. далее), а основной вклад в возбуждение атомов кислорода в этом случае происходит вследствие ударов вторичными электронами, образованными при ионизирующих столкновениях энергичных протонов с атмосферными компонентами (см. рис. 1 в [29]). Вторичные электроны при высыпаниях энергичных авроральных протонов имеют существенно меньшую среднюю энергию, чем вторичные электроны от первичных авроральных электронов, что было показано по результатам моделирования в [13]. Вероятность возбуждения $O(^1D)$ при непосредственном столкновении атома кислорода с протоном близка к нулю, так как, согласно

правилам квантово-механической селекции, при этом должно происходить изменение спина протона [29, 30].

Наиболее интенсивной (и поэтому наиболее подходящей для дистанционных измерений) из эмиссий кислородного триплетта является $\lambda 630,0$ нм. Максимум интенсивности авроральной эмиссии $\lambda 630,0$ нм отмечается на высотах 250...270 км. Столкновения атомов кислорода, находящихся в возбужденном состоянии $O(^1D)$, с молекулами кислорода и азота на более низких высотах приводят к реакциям гашения, благодаря которым работает механизм потерь:



Множественно проверено экспериментально и на моделях [10, 11, 31, 72], что распределения отношений интегрированных по столбу интенсивностей эмиссии второго типа к интенсивности эмиссии первого типа довольно точно отражает среднюю энергию электронов, которые их возбуждают. На рис. 5з (см. с. 40) представлены зависимости отношения интенсивностей эмиссий $I_{630}/I_{427,8}$ от характеристической энергии электронов E_0 , которая при максвелловском распределении равна половине средней энергии E_{cp} . Эти соотношения проанализированы в работе (см. [72]). В диапазоне характеристических энергий до 10 кэВ зависимость $I_{630}/I_{427,8} = 3,3E_0^{-2,1}$ (жирная прямая линия на рис. 5з, см. с. 40) оказалась удовлетворяющей результатам наземных и орбитальных данных. Поэтому при «наложении» одновременно экспонированных изображений эмиссий второго и первого типа необходимо учитывать, что электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля, т. е. каждый конкретный элемент изображения одной эмиссии должен быть сопряжен по силовой линии магнитного поля с конкретным элементом изображения второй эмиссии. Эту операцию с данными предусматривается проводить с помощью диалоговой программы «Вектор» (см. далее).

Современные оптические схемы позволяют расширить угол поля зрения бортового монохроматического изображающего прибора (имаджера) до 30 и более градусов, а в перспективе до полного панорамного обзора с низкоапогейной орбиты (см. [32]). Это качество обеспечивает возможность получения монохроматических изображений эмиссий, излучаемых на разных высотах, в широком поле одновременно, а значит и тех характеристик ионосферы, которые вычисляются по распределениям их интенсивности и являются конечным искомым продуктом.

В табл. 3 (см. с. 41) представлены номинальные интенсивности тех конкретных эмиссий (как в авроре, так и в излучении верхней атмосферы), которые используются в качестве инструментов дистанционной диагностики характеристик ионосферы (см. далее). На рис. 6 (см. с. 41) представлены атомарные и молекулярные энергетические переходы, в соответствии с которыми возбуждаются и излучаются рассматриваемые эмиссии.

3.2. В этом параграфе акцентируем внимание на некоторых из методических задач, которые необходимо решать, прежде чем анализировать изображение

аврорального фрагмента, полученное с орбиты в видимой области спектра, и использовать его для расчетов энергетических характеристик высыпавшихся заряженных частиц. Кроме учета характеристик оптической схемы и бленды имаджера, влияющих на вклад в структуру сигнала детектора изображения, необходимо проведение ряда коррекций получаемых изображений. Речь идет об изображениях, получаемых с направлений, находящихся в пределах углов $\pm 30^\circ$ от нормали к Земле). *Коррекция глобальных ВУФ-изображений на интенсивность dayglow* рассматривается в конце следующего пункта.

Прежде всего наблюдаемое монохроматическое изображение необходимо скорректировать на отражение от подстилающей поверхности, рассеяние и поглощение в атмосфере по пути луча. В связи с тем, что ван-райновское тангенциальное усиление изотропного излучающего слоя увеличивает отражение на больших зенитных углах, а рассеяние света от ламбертовской поверхности происходит по закону косинуса, профиль наблюдаемой сверху авроральной формы уширяется рассеянным от Земли светом. Методика коррекции (в одномерном варианте) была предложена во время проведения фотометрических экспериментов на КА Atmospheric Explorer — C и D, а также КА ISIS-II, а затем развита и для двумерной геометрии [33,34]. Автор настоящей работы адаптировал в 1980-х гг. методику коррекции на отражение для анализа данных фотометрических экспериментов на орбитах советских КА «Ореол-3» и «ИК-Болгария-1300» [35]. Суть методики заключается в вычислении (итерационным способом, так как коэффициент альbedo в большинстве случаев не известен) истинной функции интенсивности, свернутой под интегралом с функцией отражения. В результате решения интегрального уравнения (3) для двумерного случая изображение авроральной формы становится близким к истинному. После коррекции заметно уточняются границы наблюдаемых ярких авроральных образований, а следовательно, и те характеристики, которые вычисляются на основе распределений интенсивности эмиссий.

$$I_m(\mathbf{r}, \theta) = I_a(\mathbf{r}) + \int_{-\infty}^{\infty} \int I_a(\mathbf{r}_a) R_2\left(\left|\mathbf{r} - \mathbf{r}_a\right|, \theta\right) d\mathbf{r}_a, \quad (3)$$

где $I_m(\mathbf{r}, \theta)$ — наблюдаемая интенсивность при наблюдении в направлении угла θ от направления в надири; $I_a(\mathbf{r})$ — интенсивность источника (фрагмента авроральной формы), если смотреть на него вдоль нормали к точке \mathbf{r}_a ; $R_2\left(\left|\mathbf{r} - \mathbf{r}_a\right|, \theta\right)$ — двумерная весовая функция. Второе слагаемое в уравнении (3), представляющее паразитный рассеянный свет, есть свертка функции источника с рядом уширяющих функций. В общем случае весовая функция может быть представлена в виде произведения функций:

$$R_2\left(\left|\mathbf{r} - \mathbf{r}_a\right|, \theta\right) = \left[\frac{za}{\pi} \frac{1}{\left[(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + z^2\right]^{3/2}} \right] \times \left[\frac{z}{\pi} \frac{\sigma(\lambda, a, \eta, \xi, \Phi_0)}{\left[(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + z^2\right]^{3/2}} \right] \times \left[\exp\left\{-\frac{d}{z} \left[(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + z^2\right]^{1/2}\right\} \right] \times \left[\exp\left\{-\frac{d}{\cos\theta}\right\} \right], \quad (4)$$

где множитель 1 представляет рассеяние света, падающего от источника к Земле; 2 — рассеяние света атмосферой; 3 — поглощение света, идущего от источника к Земле; 4 — поглощение отраженного света, идущего от Земли к имаджеру на КА; a — альбеда подстилающей поверхности; z — высота излучающего слоя над рассеивающей поверхностью; d — оптическая толща атмосферы; $\eta = \cos \theta$; $\zeta = \cos \beta$, где β — угол между падающим лучом и нормалью к поверхности; Φ_0 — азимутальный угол падающего луча; $\sigma(\lambda, a, \eta, \zeta, \Phi_0)$ — коэффициент рассеяния атмосферы; λ — длина волны излучаемой эмиссии.

Для того чтобы получить функцию интенсивности источника, уравнение (3) инвертируется с использованием свойства фурье-трансформации свертки:

$$I_a(\mathbf{r}_a) = I_m(\mathbf{r}, \theta) - \int \int I_m(\mathbf{r}, \theta) R_2^{-1}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_a|, \theta) d\mathbf{r}, \quad (5)$$

где инверсная весовая функция есть

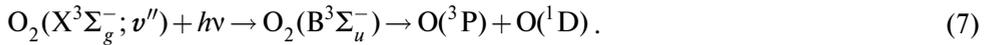
$$R_2^{-1}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_a|, \theta) = \left\{ \frac{F\{R_2\}}{1 + F\{R_2\}} \right\}, \quad (6)$$

здесь F — фурье-преобразование; F^{-1} — инверсное обратное фурье-преобразование.

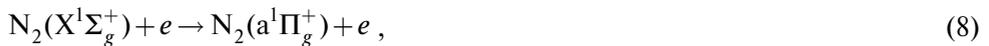
Кроме вышеописанной коррекции изображений на отражение от подстилающей поверхности необходимо оценивать учет вклада паразитной фоновой засветки от подстилающей поверхности, освещенной Луной. Интенсивность солнечного света, отраженного от поверхности Луны, связана с фазой Луны нелинейной функцией Ружье $I(\Psi)$, которая достигает резкого максимума при полной фазе Луны ($\Psi = 0$) [36]. Отражаясь от подстилающей поверхности, лунный свет (даже при больших углах Ψ) дает заметный вклад в сигнал, регистрируемый детектором. Этот вклад должен учитываться для каждого пиксела CCD-детектора на основе расчетов в одном из блоков упомянутой выше разрабатываемой в Томском государственном университете (автор — Баньщикова М. А.) диалоговой программы «Вектор», в которой будут рассчитываться сопутствующие геофизические параметры (включая географические, геомагнитные, астрономические) вдоль орбиты для точки центра масс КА, а также для любого из элементарных векторов наблюдения (в пределах угла поля зрения) с учетом данных текущей ориентации строительных осей КА.

Еще одной задачей предварительного анализа наблюдаемых изображений является проверка географических координат точки касания поверхности Земли элементарным вектором наблюдения (в угле, стягиваемом одним пикселом детектора), если его продлить от орбитальной точки наблюдения до поверхности Земли. Так как на поверхности Земли находятся населенные пункты, которые ночью освещаются лампами, то эта проверка необходима для того, чтобы идентифицировать засветки от поверхностных источников света. Это особенно важно при анализе мелкомасштабных авроральных фрагментов. Так как населенных пунктов в полярных широтах относительно немного, то их координаты могут быть каталогизированы, что предполагается осуществить в рамках упомянутой выше программы «Вектор».

3.3. В спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) для диагностики состояния ионосферы, так же как и в видимом диапазоне, используется механизм потерь энергии энергичными частицами. В диапазоне ВУФ протяженность сечения поглощения квантов нижележащим слоем молекулярного кислорода (континуум Шумана–Рунге) ограничена интервалом 130...175 нм с максимумом, расположенным вблизи $\lambda 142$ нм (см. рис. 5з, адаптированный из [37]). Процесс поглощения ВУФ-квантов происходит благодаря реакции фотодиссоциации



Для дистанционных измерений ионосферных характеристик в этой спектральной области наиболее эффективно пользоваться свечением относительно протяженной по спектру системы полос Лаймана – Берджи – Хопфельда (LBH), излучаемой молекулярным азотом после его столкновений с энергичными авроральными частицами в диапазоне $\lambda 127,3...255,5$ нм (из недавних работ, посвященных исследованиям сечения ударного возбуждения эмиссии LBH энергичными электронами следует отметить [38]):



Модельным исследованиям возбуждения полос LBH в протонной авроре посвящена работа [39]. В ней показано, что на более низких энергиях протонов ($\sim 1...10$ кэВ) в возбуждении полос LBH доминируют столкновения N_2 как с протонами, так и с атомами водорода, образованными в реакции перезарядки (см. далее) с протонами, а вклад вторичных электронов достаточно мал. При энергиях высыпавшихся протонов более 20 кэВ вклад вторичных электронов в возбуждение полос LBH становится соизмеримым с вкладом водородных атомов и протонов.

Благодаря тому, что более длинноволновая часть полос находится вне спектральной области поглощения, измеренные распределения их интенсивностей LBH_{long} можно использовать для анализа потока энергии вторичной электронной продукции от высыпавшихся энергичных электронов и протонов (см. рис. 5д, с. 40), адаптированный из [40]). Такие изображения обеспечивают возможность анализа временного и пространственного характера поведения авроры. С другой стороны, измеренные распределения интенсивности в более коротковолновой спектральной части системы полос LBH_{long} из-за поглощения нижележащими молекулами O_2 отображают различное распределение интенсивности от высоты. Поэтому по данным распределений интенсивности в поддиапазонах LBH_{long} и $\text{LBH}_{\text{short}}$, полученным одновременно, можно оценивать распределения средней энергии высыпавшихся частиц (см. рис. 5е и ж, с. 40, адаптированные из [37]). Для этого берется отношение интенсивностей полос LBH, находящихся в области поглощения, к интенсивности полос LBH, расположенных вне области поглощения, т. е. $I_{\text{LBHshort}}/I_{\text{LBHlong}}$. Получается, что отношение интенсивностей в двух этих ВУФ-поддиапазонах является функцией плотности O_2 в столбе на

высоте максимума эмиссии, т. е. функцией максимума эмиссии от высоты. Используя транспортную модель электронов и протонов, можно установить соотношение между высотой максимума эмиссии и средней энергией выпадающих частиц. Для очень мягких частиц, которые не проникают глубоко в атмосферу, отношение интегральных интенсивностей в вышеуказанных ВУФ-поддиапазонах может быть нормировано на 1. Тогда для более энергичных частиц, которые проникают глубже, где поглощение O_2 более значительно, более длинноволновые эмиссионные полосы будут интенсивнее, а отношение интенсивностей будет много меньше 1.

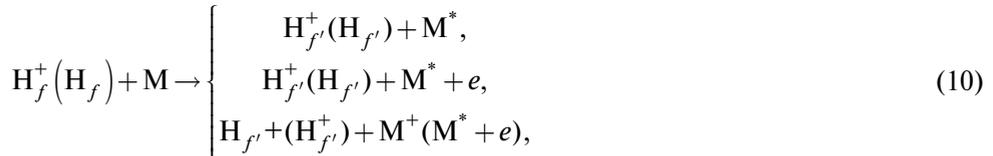
Заметим, что интегральная авроральная интенсивность полос ЛВН достигает значений более 25 кР, причем ~20 % этой интенсивности возбуждается при столкновениях молекул азота с энергичными протонами, атомами водорода и их вторичной электронной продукцией (см. [29]), а «фоновая» (dayglow) интенсивность ЛВН немногим меньше авроральной, что приводит к контрасту аврорального изображения овала на фоне освещенной атмосферы в лучшем случае 2:1. На фоне неосвещенной атмосферы контраст увеличивается. Это видно из рис. 7 (см. с. 42), который адаптирован из работы [41]. На верхней части рисунка показана последовательность из шести ВУФ-изображений (ЛВН), полученных по данным с изображающей камеры WIC на КА IMAGE 11 августа 2000 г. с 06:38:12 по 07:08:51 UT. Эти изображения (а) показывают распределения наблюдаемых суммарных ВУФ-интенсивностей ЛВН как дневного свечения (dayglow), так и аврорального. В нижней части рис. 7 (см. с. 42) представлены те же самые изображения, но скорректированные автором [41] на дневное свечение по адаптированной эмпирической методике, первоначально предложенной в работе [42] для коррекции ВУФ-изображений, полученных в проекте DE-1. Подобная коррекция авроральных ВУФ-изображений на интенсивность дневного свечения будет необходима и в экспериментах с ВУФ-имаджером на орбите КА «Электро-ВО» (см. разд. 6).

На рис. 8 (см. с. 42), адаптированном из [41], показаны ВУФ-изображения (ЛВН) аврорального овала, полученные 4 декабря 2000 г. при координированных наблюдениях с двух высокоапогейных КА: вверху с КА POLAR имаджер UVI (камера ЛВН) и внизу — с КА IMAGE (камера WIC). Обе серии изображений скорректированы на интенсивность “dayglow”. При сравнении этих изображений необходимо обратить внимание на разницу (приблизительно в 2,5 раза) в абсолютной калибровке приборов UVI и WIC. Это свидетельствует о трудностях и неопределенностях, возникающих в процессе абсолютной калибровки изображающих приборов в ВУФ-области спектра.

3.4. Дистанционная диагностика распределений энергетических характеристик выпадающих протонов сложнее, чем электронов, и вот почему.

3.4.1. Эмиссионные линии, излучаемые атомами водорода, из-за реакции перезарядки с энергичными выпадающими протонами испытывают доплеровский сдвиг влево или вправо (по спектру) в зависимости от того, откуда они наблюдаются (с поверхности Земли или с орбиты соответственно), т. е. наблюдаемый доплеровский профиль линии отображает сумму вкладов всех векторов

скорости водородных атомов, спроецированных на линию зрения. Часть авроральных протонов, захватывая электрон при обдирочном столкновении с атомом или молекулой (O_2 , N_2 и O), становятся нейтральными атомами и переходят в возбужденное состояние (см. реакцию ниже), а потом, прежде чем снова потерять электрон и стать протоном, возвращаясь в основное состояние, отдают свою энергию в виде эмиссии:



где M — это атмосферные компоненты O_2 , N_2 или O ; $H_{f'}$ — вторичный энергичный атом; $H_{f'}^+$ — вторичный энергичный протон.

Циклы перезарядки могут повторяться от сотен до десятков тысяч раз в зависимости от первичной энергии высыпавшихся протонов. При этом водородные атомы, практически сохраняя кинетическую энергию, которая была у протонов до перезарядки, продолжают двигаться вдоль касательной к спиральной траектории протона, т. е. разворачиваются как бы более горизонтально. По этой причине и благодаря тому, что гирорадиус протона значительно больше гирорадиуса электрона, картина аврорального водородного свечения получается как бы более размазанной по пространству в отличие от электронной, что является одной из причин того, что протонный авроральный овал имеет свои, частично не совпадающие с электронным овалом, границы. В результате высыпания протонного пучка в атмосферу образующаяся смесь энергичных протонов и водородных атомов вызывает ионизацию, диссоциацию и возбуждение атмосферных компонент причем, как уже говорилось выше (п. 3.1), образующиеся вторичные электроны имеют энергетическое распределение с более низкой средней энергией, чем вторичная электронная продукция от энергичных авроральных электронов или фотоионизации. Как «протонные», так и «электронные» вторичные электроны, двигаясь вдоль магнитного поля, растрачивают энергию на ионизацию и возбуждение авроральных эмиссий.

3.4.2. Для определения энергетических характеристик высыпавшихся энергичных авроральных протонов по монохроматическим изображениям в видимом диапазоне спектра используется одна из линий бальмеровской серии (см. рис. 6 и табл. 3, с. 41), излучаемой атомами водорода. Чаще используется профиль линии H_β . Зависимость интенсивности этой линии от средней энергии высыпавшихся протонов показана на рис. 5а (см. с. 40), адаптированном из [28]. И хотя в непосредственной близости от линии H_β нет эмиссии электронной авроры, интенсивность непрерывного фона соизмерима с интенсивностью самой линии и варьирует с интенсивностью некоторых эмиссий электронной авроры. Это обстоятельство накладывает определенные требования на фотометрические измерения фона в окрестности линии H_β .

Линия H_α более интенсивная, но используется редко, так как находится (блендируется) в спектральной близости от полос первой положительной си-

стемы молекулы азота IPG (7,4), которые имеют интенсивность $\sim 0,5 \dots 1$ Р/нм в электронной авроре.

В ВУФ-диапазоне для диагностики реакции ионосферы на высыпания энергичных протонов и определения их средней энергии используется водородная линия Ly_{α} , ее интенсивности примерно в 36 раз выше, чем у линии H_{β} [43]. Крылья ее профиля, как и профилей Бальмеровских линий, формируются благодаря как доплеровскому сдвигу в более длинноволновую область спектра (при наблюдениях с орбиты), при этом величина сдвига и протяженность крыла профиля возрастает с увеличением энергии авроральных протонов, так и доплеровскому сдвигу в более коротковолновую область в зависимости от энергии магнитно-отраженных протонов, двигающихся от Земли. В работе [74] было показано, что эффект магнитного отражения относительно мал, и поэтому интегральная интенсивность коротковолнового крыла профиля линии Ly_{α} существенно ниже интенсивности длинноволнового крыла, а его спектральная протяженность меньше.

Результаты моделирования в работе [15, 44] высыпаний протонов в авроре с использованием метода Монте-Карло показали, что относительные протяженности крыльев доплеровских профилей линий H_{β} и Ly_{α} являются лучшим индикатором энергетических характеристик протонов, чем спектральное положение их максимумов (доплеровский сдвиг). Это объясняется тем, что во влиянии на доплеровский сдвиг максимума профиля водородной линии при возрастании энергии высыпавшихся протонов разнонаправлено соревнуются два процесса. Присутствие более протяженного (более длинноволнового при наблюдениях сверху) крыла в профиле линии, обязанное большому количеству более энергичных протонов особенно в супертепловом распределении типа каппа (см. например [45, 46]), приводит к большому сдвигу максимума вправо от холодной (геокоорональной) линии Ly_{α} . С другой стороны, эти более энергичные протоны испытывают больше столкновений, что приводит к большему угловому перераспределению на фиксированной энергии, т. е. более энергичные протоны (водородные атомы) в конечном счете сильнее изотропизируются. Так как более изотропизованные Н-атомы дают вклад в длину волны, которая ближе к холодной линии, этот процесс будет сдвигать максимум доплеровского профиля в сторону максимума профиля холодной линии.

3.4.3. Спектральная близость между доплеровски несдвинутой (рассеянной в атмосфере геокоорональной) линией Ly_{α} ($\lambda 121,5667$ нм) и доплеровски сдвинутой авроральной линией Ly_{α} ($\lambda 121,8 \pm 0,1$ нм) в целях их селекции вынуждает экспериментаторов пользоваться не просто монохроматической изображающей оптикой, а спектрографической изображающей системой высокого разрешения, для того чтобы отделить авроральное излучение от геокооронального при наблюдениях с орбиты КА IMAGE [8]. Кроме того, использование спектрографической схемы позволяет селективировать интенсивность линии Ly_{α} от расположенной поблизости очень интенсивной линии атома азота $\lambda 120,0$ нм.

Рассмотрим несколько примеров, связанных с изображением электронного и протонного овалов с высокоапогейной орбиты в различных геомагнитных условиях. Пример динамики границ электронного (оранжевый цвет) и протонного

(синий цвет) авроральных овалов во время развития малой суббури, наблюдавшейся 28 июня 2000 г. с 19:56 по 20:49 UT с орбиты КА IMAGE (приборы WIC и SI12 соответственно), можно видеть на рис. 9 (см. с. 43), адаптированном из [47]. Под этим рисунком показан пример результатов наблюдения с КА IMAGE 7 июня 2000 г. (см. рис. 10, с. 43, адаптированный из [48]) структурированных авроральных форм различных масштабов в электронном овале по интенсивности полос LBH (левая панель) и интенсивности кислородной линии $\lambda 135,6$ нм (средняя панель) и их отсутствия в это же время в протонном диффузном овале по интенсивности Ly_{α} (правая панель). Авторы работы [48] с некоторой долей вероятности отнесли происхождение этих форм за счет высыпающихся электронов со структурой спектра типа Inverted-V.

На двух верхних панелях (*a* и *b*) рис. 11 (см. с. 43), адаптированного из [49], дан пример серии глобальных распределений интенсивности полос LBH и интенсивности линии Ly_{α} , полученных 5 ноября 2000 г. с орбиты КА IMAGE с помощью изображающей камеры WIC и спектрографического имаджера SI12 соответственно в условиях положительных B_z и B_y -компонент ММП, когда (как по протонам, так и по электронам) наблюдалась θ -аврора в полярной шапке и яркое пятно в вечернем секторе аврорального овала [49]. На двух нижних панелях (*b* и *z*) этого рисунка показаны распределения потоков энергии высыпающихся протонов F_p (панель *b*) и электронов F_e (панель *z*), рассчитанные по соответствующим распределениям интенсивностей Ly_{α} (панель *a*) и LBH (панель *b*). В распределении F_e вычтен вклад потока энергии протонов в интенсивность LBH.

Рассмотрим пример наблюдений протонного аврорального овала и каспа по интенсивности Ly_{α} , в условиях B_z (ММП) ≈ 20 нТ, показанный на рис. 12 (см. с. 44). На рис. 12*d* (см. с. 44) приведены смоделированные доплеровски-сдвинутые вправо профили линии Ly_{α} для максвелловской формы спектров высыпающихся протонов, полученных в области каспа (зеленый цвет) и в ночной авроральной области (красный цвет). Вертикальной черной линией на этой панели показано положение доплеровски не сдвинутой (холодной) геокорональной линии Ly_{α} [48]. В табл. 4, приведенной на рис. 12 (см. с. 44) даны характеристики модельных профилей интенсивности Ly_{α} для различных форм энергетических распределений высыпающихся протонов с потоком энергии $1 \text{ эрг/см}^2\text{с}$, которые были рассчитаны в работе [44]. На рис. 12*e* (см. с. 44) в координатах дипольная широта – геомагнитное местное время представлено изображение протонного аврорального овала в Ly_{α} , полученное с КА IMAGE в 09:23:50 UT 27 ноября 2000 г. с помощью SI12 в условиях смены знака B_z -компоненты межпланетного поля (ММП), которое в это время измерялось на КА ACE с задержкой в 41 мин [50], эти измерения показаны на рис. 12*z* (см. с. 44). В полуденной части протонного аврорального овала выделяется интенсивное пятно дневного полярного каспа. Чтобы проследить динамику смещения каспа, зависящую от знака B_y -компоненты ММП, авторы работы [50] составили пространственно-временную кеограмму интенсивности Ly_{α} над станцией Longyearbyen (Шпицберген) по серии последовательных изображений Ly_{α} с КА IMAGE с 07:59 по 10:00 UT. Эту кеограмму можно видеть на рис. 12*b* (см. с. 44). Над кеограммой (на рис. 12*a*, см. с. 44) представлены протонные спектры, полученные с орбиты КА DMSP F12, который пересекал вечерне-полуденную область аврорального овала именно в

этом интервале времени (рис. 12в, см. с. 44). Проекция орбиты КА DMSP F12 наложена на изображение аврорального овала (см. рис. 12в, с. 44), белым крестиком на ней отмечен интервал времени 09:24–09:25 UT, когда измерялись протонные спектры. На рис. 12е (см. с. 44) показаны доплеровски-сдвинутые влево профили водородной линии H_{β} , так как они рассчитаны для магнитного зенита с помощью модели транспорта протонов [12] по данным измеренных на КА DMSP F12 спектров протонов (рис. 12а, см. с. 44).

4. ЭМПИРИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПРОВОДИМОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ

В работе [3] сделан подробный обзор эмпирических соотношений для интегрированных по высоте поперечных проводимостей ионосферы, образованных благодаря как потоку высыпающихся электронов, так и потоку высыпающихся протонов. Приведем эти соотношения, выведенные в статье [51]:

$$\Sigma_P^e = \left[\frac{40E_{cp}^e}{16} + (E_{cp}^e)^2 \right] (F_e)^{0,5}, \quad (11)$$

$$\Sigma_H^e = \left[\frac{18(E_{cp}^e)^{1,85}}{16} + (E_{cp}^e)^2 \right] (F_e)^{0,5}, \quad (12)$$

где Σ_P^e и Σ_H^e — в См; F_e — в мВт·м⁻²; E_{cp} представляется в виде отношения

$$E_{cp} = \frac{\int_0^{\infty} Ef(E) dE}{\int_0^{\infty} f(E) dE}, \quad (13)$$

причем E_{cp} изменяется в диапазоне 0,5...20 кэВ.

Соотношения для интегрированных по высоте проводимостей, образованных только благодаря потоку высыпающихся протонов, выведены в работе [52]:

$$\Sigma_P^p = 5,7(F_p)^{0,5}, \quad (14)$$

$$\Sigma_H^p = 2,6(E_{cp}^p)^{0,3}(F_p)^{0,5}, \quad (15)$$

где Σ_P^p и Σ_H^p — в См; F_p — в мВт·м⁻²; E_{cp} может изменяться в интервале 2...40 кэВ.

Сравнительный анализ (14) и (11) показывает (см. рис. 5в, с. 40, адаптированный из [52]), что, в то время как Σ_P^p практически не зависит от средней энергии падающих протонов в диапазоне энергий 2...40 кэВ, Σ_P^e зависит от этой энергии значительно. Это отличие может быть объяснено тем, что функции потери энергии могут по-разному изменяться с энергией для электронов и протонов.

Выше 200 эВ функция потерь энергии возрастает с энергией протонов [51], но уменьшается с возрастанием энергии электронов. Следовательно, когда первоначальная энергия протона увеличивается, он теряет энергию более быстро и достигает небольшого дополнительного проникновения в атмосферу, однако, когда энергия электрона увеличивается, он теряет энергию более медленно и проникает в атмосферу более глубоко. Поэтому скорость ионизации от протонов по сравнению с электронами достигает максимума в более маленьком диапазоне высот.

Так как педерсеновская подвижность протона [53] имеет максимум вблизи 120 км, ионизация вблизи этой высоты дает самый эффективный вклад в педерсеновскую проводимость. При этом высота максимума ионизации протонами со средними энергиями от 2 до 40 кэВ никогда не отличается от 120 км больше чем на 8 км. Принимая в расчет спад в Σ_p^e для низких и высоких средних энергий, ионизация электронами (со средней энергией ~ 1 кэВ) достигает максимума много выше, в то время как ионизация электронами (со средней энергией ~ 20 кэВ) достигает максимума существенно ниже 120 км. Из (11) получается, что Σ_p^e достигает своего максимума на $E_{cp} \approx 4$ кэВ со значением 5 См для $F_e = 1$ мВт·м⁻². На энергиях $E_{cp} \approx 20$ кэВ ее значение уменьшается до 1,9 См. Однако Σ_p^p из (14) практически постоянно со значением 5,7 См. Более высокие значения получаются для Σ_p^p по сравнению с Σ_p^e благодаря обоим эффектам (упомянутым выше), касающимся как высот ионизации электронами, так и различных значений потерь энергии на произведенную электронно-ионную пару, более низких для протонов, чем для электронов.

Для данных значений средней энергии и потока энергии протоны и водородные атомы производят более тотальную ионизацию, чем электроны, причем вторичные электроны от процессов ионизации в чисто протонных высыпаниях имеют более низкую среднюю энергию, чем вторичные электроны в чисто электронных полярных сияниях. Это происходит благодаря тому, что для аврорального диапазона энергий поперечные сечения для вторичной электронной продукции, произведенной ударом протона или водородным атомом, уменьшаются экспоненциально с возрастанием энергии вторичных электронов.

На рис. 13 и 14 (см. с. 45), адаптированных из [54], показан пример дистанционных наблюдений динамики глобальных распределений интегрированных по высоте поперечных проводимостей ионосферы (Σ_p — в левых колонках и Σ_h — в правых) во время спокойных геомагнитных условий при планетарном К-индексе $K_p = 2$ (см. рис. 14, с. 45) и во время возмущенных геомагнитных условий при $K_p = 8$ (см. рис. 13, с. 45). Эти распределения рассчитаны на основе монохроматических ВУФ-изображений всего аврорального овала, полученных в экспериментах с изображающей камерой WIC (LBH) и спектрографическими имаджерами SI12 (Ly_α) и SI13 (135,6 нм OI) на КА IMAGE [6–8]. На панелях *e* и *f* (см. рис. 13 и 14, с. 45) приведены распределения суммарных проводимостей индуцированных от высыпаний авроральных электронов и протонов и от фона экстремального ультрафиолета, на панелях *c* и *d* приведены распределения проводимостей только от вклада протонов, а на панелях *a* и *b* — только от вклада электронов. Один из важных результатов, показанный на этих рисунках, заключается в том, что в спокойных геомагнитных условиях возрастание ионосферной

проводимости вследствие высыпаний протонов может достигать 50 % (в глобальном масштабе) и до 100% — в отдельных местах аврорального овала [54]

В заключение необходимо отметить, что на основе данных дистанционного картографирования с орбиты КА распределений поперечных ионосферных проводимостей, интегрированных по высоте, по монохроматическим изображениям авроральных эмиссий можно строить локальные поля скоростей Джоулева нагрева W (интегрированные по высоте) с помощью методики, которая была предложена датскими специалистами при наземных наблюдениях в юго-западной Гренландии. Эта методика может быть реализована в предположении условий нулевой скорости нейтрального ветра в ионосфере (в первом приближении) при проведении координированных экспериментов при пролете КА над зоной действия радара некогерентного обратного рассеяния и наземной меридиональной цепочкой магнитометрических станций [55, 56].

5. ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОЕКТОВ ПО АВРОРАЛЬНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ С ОРБИТЫ

5.1. Из готовящихся зарубежных проектов на низкоапогейных орбитах в самое ближайшее время (2011) уместно упомянуть канадский проект Enhanced Polar Outflow Probe (e-POP) на маленьком КА Cassiope, нацеленный на исследования процессов в околоземной плазме субполярной и полярной ионосферы вместе с одновременным проведением экспериментов по локальной модификации ионосферных плазменных характеристик сетью мощных как когерентных, так и некогерентных стенов радиоизлучения SuperDarn (Super Dual Auroral Radar Network) в рамках программы HAARP (High Frequency active Auroral Research Program) [57]. В составе научной аппаратуры на этом КА присутствует изображающий трехканальный монохроматический прибор FAI (Fast Auroral Imager), задача которого регистрировать с орбиты как природные авроральные изображения, так и узлокализированные эффекты свечения верхней атмосферы и ионосферы, которые появляются под действием направленных пучков высокочастотного излучения от наземных стенов.

5.2. Из высокоапогейных орбитальных проектов следует упомянуть следующие два.

В ряде стран ведется проработка (в разной степени готовности) космических проектов на орбитах типа «Молния». В Канаде и европейских странах в рамках программы ILWS подготавливаются эксперименты и комплекс приборов Polar Highly Elliptical/Molniya Orbit Science Payload (PHAMOS) для КА Polar Communication and Weather (PCW), программа которых нацелена на диагностические измерения характеристик полярной ионосферы и магнитосферы.

В состав этого комплекса входит аппаратура в диапазоне ВУФ (прибор MUVI, который в первом варианте назывался RAVENS (Recurrent Auroral Visualization of Extended Northern Storm), и прибор SI), в диапазоне экстремального ультрафиолета (EUV-imager) и гамма-диапазоне (прибор MOXI). Проект PCW предполагается осуществить на двух, ориентированных на Землю космических

аппаратах, орбиты которых будут иметь следующие параметры: высота апогея — 39 500 км, высота перигея — 600 км, наклонение плоскости орбиты $63,4^\circ$. Первый и второй КА будут достигать апогея в северной полусфере в противофазе.

Эксперименты (аналогичные MUVI и SI) — UVAMC и FUVSI, а также авроральный имаджер WFAI в рентгеновском диапазоне — подготавливаются в Китае в кооперации со специалистами Канады и ряда европейских стран (в рамках проекта KuaFu) на КА KuaFu-B, который намечено вывести на орбиту типа «Молния» с близкими параметрами, но с апогеем в южной полусфере. Такое расположение орбит КА в Канадском и Китайском проектах позволит при одновременных измерениях исследовать утро-вечер асимметрию авроральных овалов и не сопряженное положение тета-авроры при северных значениях межпланетного магнитного поля, которые неоднократно наблюдались с орбит КА DE-1, Polar и IMAGE и предсказаны в моделях [58, 59].

6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПЕРСПЕКТИВНЫХ РОССИЙСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Рассмотрим эксперименты по дистанционной диагностике ионосферных характеристик, подготовка и проведение которых планируется ИКИ РАН совместно с Научным центром оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ), Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО) Росгидромет и ОАО «Геофизика-Космос» на орбитах перспективных отечественных КА в 2015–2017 гг. Предварительные характеристики изображающих монохроматических приборов для этих КА и предварительные характеристики орбит представлены в табл. 1 (см. с. 35).

На рис. 12 (см. с. 34) условно показаны обстановка экспериментов и геометрия наблюдений авроральных характеристик с орбит трех КА: «Зонд» (проект ИОНОЗОНД), «Метеор-МП» на низкоапогейных полярных орбитах и «Электро-ВО» на высокоапогейной орбите. Предполагается, что в перспективе КА «Электро-ВО» войдут в системную группировку по космическому мониторингу Арктической зоны, которая в средствах массовой информации позиционируется как проект «Арктика» [60.]

Подчеркнем важное преимущество, которое будет иметь эксперимент с ВУФ-имаджером (в двух поддиапазонах ЛВН) на борту КА «Электро-ВО» (см. табл. 1, с. 35) перед экспериментом с изображающей камерой WIC [5] на борту КА IMAGE. Это преимущество обеспечивается постоянной ориентацией строительной оси (+X) КА «Электро-ВО» на центр Земли. Так как интенсивность линий ЛВН, возбужденных авроральными энергичными частицами (электронами и вторичной электронной продукцией от протонов) относительно невелика по сравнению, например, с интенсивностью водородной линии Ly_α , то постоянное направление изображающих камер на Землю позволит использовать времена экспозиций изображения ($t_{\text{эксп}} \approx 20...40$ с) и получать в минуту изображение аврорального овала в каждом канале. Из-за спинового вращения КА IMAGE, имеющего период ~ 120 с, изображения экспонируются в течение 4...5 с за один спиновый период, что обеспечивает получение одного изображения за один оборот только при условии достаточно интенсивной авроры (например, во время

суббури). При спокойных геомагнитных условиях, когда авроральная интенсивность излучения LBH минимальна, в эксперименте с камерой WIS изображение аврорального овала могло быть зарегистрировано детектором только за несколько спиновых периодов КА.

В конечном счете, условия авроральных наблюдений с орбиты КА «Электро-ВО» позволяют в качестве изображающих детекторов использовать матрицы с числом пикселей 1024×1024 (с предварительным усилением интенсивности на МКП) и таким образом увеличить пространственное разрешение изображающих камер примерно до ~ 12 км/пиксел (с высоты апогея КА).

На рис. 15 (см. с. 46) показаны условия и геометрия наблюдений в эксперименте с монохроматическим имаджером «Летиция» на КА «Зонд». В связи со спецификой параметров орбиты КА (см. табл. 1, с. 35) и ориентацией строительной оси (+Y) на Солнце ось поля зрения прибора отвернута на угол $\Phi = 30^\circ$ в плоскости Y–Z в противосолнечную сторону для минимизации засветок от рассеянного солнечного света. В период зимнего солнцестояния такой угол позволит проводить наблюдения авроры как на фоне неосвещенной подстилающей поверхности, так и в лимбе верхней атмосферы. Проекция силовой линии магнитного поля, на которой будет находиться КА «Зонд», в данном эксперименте не будет попадать в поле зрения прибора. Прибор «Летиция» будет иметь два параллельных оптических канала с углом поля зрения $\Omega = 2\omega = 30^\circ$. Один из каналов настроен на измерение интенсивности кислородной эмиссии $\lambda 630$ нм (см. выше) на высоте ~ 250 км, а второй — на измерение интенсивности линии $\lambda 427,8$ нм первой отрицательной системы иона молекулы азота на высоте ~ 100 км. Предварительные характеристики этого прибора представлены в табл. 1 (см. с. 35).

На рис. 17 (см. с. 47) показаны условия и геометрия наблюдений в эксперименте с монохроматическим имаджером «Авровизор-ВИС/МП» на орбите КА «Метеор-МП». В этом приборе запланировано три параллельных оптических канала, каждый из которых имеет угол поля зрения $\Omega = 2\omega = 30^\circ$, оптические оси каналов направлены вдоль оси (–Z) КА, т. е. в нади́р. Первые два канала будут настроены на измерение интенсивности эмиссий $\lambda 630$ нм [OI] и $\lambda 427,8$ нм $N_2^+ 1NG$, а третий канал будет настроен на измерение интенсивности водородной линии $\lambda 486,1$ нм (H_β) (см. выше). Предварительные характеристики прибора «Авровизор-ВИС/МП» и параметры орбиты КА «Метеор-МП» представлены в табл. 1 (см. с. 35). Проекция силовой линии магнитного поля, на которой будет находиться КА «Метеор-МП», в данном эксперименте всегда будет в поле зрения каналов прибора в полярных областях, так как ее угол с вертикалью составляет величину $\gamma \approx 14^\circ$. Внизу рис. 17 (см. с. 47) зелеными толстыми стрелками условно показаны продольные токи (вверх и вниз), а также текущие благодаря анизотропии поперечной ионосферной проводимости поперечные токи (холловский ток показан красной стрелкой и педерсеновский ток — фиолетовой стрелкой).

На борту КА «Метеор-МП» будут установлены прецизионный магнитометр ФМ-МП для измерений градиентов магнитного поля и продольных токов, а также энергоугловые анализаторы МГСИ/СКЛ-МП распределений потоков электронов и протонов, высыпавшихся из магнитосферы. Эти приборы так же, как и имаджер «Авровизор-ВИС/МП», войдут в состав гелиогеофизического комплекса ГГАК/МП и будут замкнуты на общую информационно-управляющую

систему БНД/МП, построенную на базе технологии Space Wire (предварительно). Предполагается, что в систему БНД/МП будут транслироваться данные служебных систем об измерениях положения центра масс КА (параметры орбиты) и данные о мгновенной ориентации КА (по трем осям) на неосвещенной стороне орбиты на основе астроизмерений звездных датчиков. Кроме того, с помощью системы БНД/МП предполагается временная синхронизация измерений потоков заряженных частиц, градиентов магнитного поля и авроральных изображений в соответствии с выбранной логикой управления циклограммой измерений.

На рис. 18 (см. с. 47) условно показано пространственно-временное сопряжение измерений на борту КА «Метеор-МП» градиентов магнитного поля, потока энергии и средней энергии электронов и протонов с измерениями распределений интенсивности трех авроральных эмиссий.

Рассмотрим подробнее, какую информацию позволят получать монохроматические изображающие приборы на КА «Зонд», «Метеор-МП» и «Электро-ВО» и перечислим научные задачи, которые намечено решать.

На верхнем этаже наблюдений (КА «Электро-ВО») одновременные измерения распределений интенсивностей в трех поддиапазонах ВУФ: 135...160 нм (OI + LBH); 160...180 нм (LBH); 121,6 нм (Ly_{α}) и 135,6 нм [OI] позволят получать следующую информацию и решать научные задачи:

- определение положения мгновенных пространственных границ электронного и протонного аврорального овала;
- фиксирование (таймирование) динамики развития магнитосферных суббурь;
- получение мгновенного распределения потока энергии электронов по всему авроральному овалу;
- получение мгновенного распределения средней энергии электронов и протонов по всему авроральному овалу;
- получение мгновенного глобального распределения поперечных ионосферных проводимостей, интегрированных по высоте.

По результатам дистанционных наблюдений с верхнего этажа будет проводиться:

- картографирование размеров и положения аврорального овала, включая полярный касп, в зависимости от состояния межпланетного магнитного поля и геомагнитных условий;
- диагностика состояния и исследования степени влияния энергетического вклада высыпающихся из магнитосферы энергичных электронов и протонов на электродинамические характеристики полярной ионосферы, а также исследования глобальной динамики изменений (в различных геомагнитных условиях) энергетических и электродинамических характеристик полярной ионосферы.

На нижних этажах наблюдений (с орбит КА «Метеор-МП» и КА «Зонд») одновременные измерения распределений интенсивностей в трех (двух с КА «Зонд») эмиссиях верхней атмосферы и ионосферы $\lambda 630$ нм [OI], $\lambda 427,8$ нм

$N_2^+ 1NG$ и $\lambda 486,1$ нм ($H\beta$) позволят получать следующую информацию и решать научные задачи:

- проведение идентификации и распознавания наблюдаемых авроральных структур в пересекаемых спутником секторах аврорального овала с размерами несколько сотен километров, определение положения мгновенных локальных границ неосвещенного аврорального овала по электронам и по протонам;
- по данным изображений в канале $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) расчет локальных распределений (в рамках поля изображения) концентрации электронов в максимуме E-области ионосферы;
- по данным изображений в каналах $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) и $\lambda 630$ нм [OI] расчет мгновенных локальных распределений средней энергии и потока энергии авроральных электронов, а также по данным изображений в канале $\lambda 486,1$ нм ($H\beta$) расчет средней энергии авроральных протонов (в рамках поля изображения);
- по данным изображений во всех каналах расчет полей поперечных проводимостей ионосферы, интегрированных по высоте (с учетом энергетического вклада от протонов);
- обнаружение локальных градиентов интенсивности и мониторинг эффектов локального разогрева ночной ионосферы под действием мощных наземных радиисточников (на витках, проходящих над ними).

По результатам наблюдений на нижних этажах будут проводиться:

- а) исследования в различных геомагнитных условиях характеристик и динамики мелкомасштабных структур распределений интенсивности конкретных эмиссий верхней атмосферы и ионосферы в полярных областях, включая black-aurora, θ -аврора, и их связи с электродинамическими процессами в ионосфере;
- б) исследования средне- и крупномасштабных градиентов в распределениях интенсивности красной кислородной линии в средних широтах, являющихся результатом воздействия инфразвуковых волн, идущих от Земли;
- в) исследования среднемасштабных градиентов в распределениях интенсивности красной кислородной линии и водородной эмиссии в области плазмопаузы (SAR-arcs), а также в областях экваториальной ионосферной аномалии (tropical arcs);
- г) исследования локальных градиентов интенсивности эмиссий и их связи с процессами воздействия на ионосферу мощных пучков радиоизлучения и стимулированными высыпаниями заряженных частиц.

7. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

На рис. 19б (см. с. 48) показаны условия наблюдений с орбит КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» искусственно стимулированных модулированных градиентов интенсивности свечения эмиссий над зоной воздействий наземных источников радиоизлучения, а на рис. 17 (см. с. 47) условно показана геометрия таких наблюдений.

Благодаря достаточно широким углам поля зрения бортовых изображающих приборов ($2\omega \approx 30^\circ$) области воздействий смогут наблюдаться на двух суточных витках. На рис. 19а (см. с. 48) показан пример временной развертки интенсивности эмиссий $\lambda 630$ нм [OI] и $\lambda 427,8$ нм (N_2^+), полученной с 07:45 по 08:30 UT 15 апреля 2002 г. при наземных фотометрических наблюдениях в зоне воздействий, который адаптирован из работы А. В. Гуревича (см. рис. 41 в [61]). На рис. 19в (см. с. 48) показана (условно) схематическая иллюстрация эксперимента по воздействию на ионосферу волнами на верхнегибридной частоте (иллюстрация адаптирована из рис. 3.1. в [62]), приводящему к локальному нагреву холодных ионосферных электронов. При соударениях атмосферной и ионосферной компонент с электронами, имеющими энергию $E_e \geq 2$ эВ, возбуждаются эмиссии и, в частности — $\lambda 630$ нм [OI] и $\lambda 427,8$ нм (N_2^+). Учитывая, что часть нагреваемых стенов находится в области субавроральной ионосферы ($L \approx 5$), распознавание в изображениях, полученных с орбиты, искусственно возбужденных локальных градиентов интенсивности свечения эмиссий на фоне природной авроры является весьма не простой методической задачей даже при условии одновременных наземных спектрофотометрических наблюдений. Эта трудность связана с невысокой интенсивностью (сотни Рэлей) и относительно мелкими размерами (менее километра) искусственно возбужденных образований и богатой морфологией природных авроральных форм (см. рис. 3, с. 38), которые в данном случае играют роль фона. Подобная задача поставлена и перед экспериментом с имаджером FAI на орбите канадского спутника e-POP, запуск которого ожидается в 2011 г. (см. п. 5.1).

8. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ОРБИТАЛЬНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На рис. 20 (см. с. 49) показаны геометрия эксперимента и условия для использования методов времязависимой томографии при монохроматических наблюдениях относительно статичной (в течение полутора минут) авроральной структуры с орбиты КА «Метеор-МП» с помощью имаджера «Авровизор-ВИС/МП». В течение пролета над областью структурированного аврорального свечения прибор получает несколько десятков изображений интенсивности каждой измеряемой эмиссии под разными азимутальными углами. На рис. 21 (см. с. 49) можно видеть смоделированную последовательность изображений (смаз) в канале $\lambda 427,8$ нм, которые регистрируются прибором «Авровизор-ВИС/МП» в течение полутора минут при пролете КА «Метеор-МП» над одним из секторов аврорального овала.

Проекция магнитной силовой линии, на которой в конкретный момент экспозиции изображения находится КА, на плоскость изображения на высоте (foot point) свечения ($h_1 = 270$ км и $h_2 = 105$ км) изменяется от изображения к изображению (см. рис. 20, с. 49). При этом изменяется расположение изображения каждого элементарного объема свечения (воксела), проецируемое на конкретный пиксел соответствующего детектора (CCD) в конкретном изображающем канале прибора (см. табл. 1, с. 35). Каждый пиксел детектора стягивает угол $\sim 1,8'$, что соответствует размеру грани одного воксела $\sim 0,3$ км (на дистанции с высоты

орбиты до слоя свечения на высоте h_1). По аналогии с медицинской томографией, когда конкретный объект последовательно просвечивается под разными азимутальными углами, и на основе полученной серии плоских изображений реконструируется объемное, из серии полученных с орбиты плоских авроральных изображений с помощью математических методов компьютеризированной томографии (зависящей от времени) можно получить объемное авроральное изображение в каждой эмиссии. Для решения этой задачи можно использовать преобразование Радона, которое уже применяется в медицинской томографии [63].

Наиболее информационноемкой частью спектрофотометрических орбитальных экспериментов для томографического анализа изображений и получения объемных распределений эмиссий в авроральных структурах представляются интервалы времени пролета КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» над зонами охвата цепочек наземных all-sky изображающих приборов, например скандинавской цепочкой ALIS или канадской цепочкой, использованной при реализации космического проекта THEMIS. В настоящее время уже накоплен опыт реконструкции полученных с Земли авроральных изображений и их томографического анализа. Примеры таких реконструкций, полученных с цепочек меридиональных сканирующих фотометров и монохроматических камер всего неба, и обзор методов CIT можно найти в [27, 63–67].

Томографический метод реконструкции и анализа орбитальных лимбовых авроральных изображений, использованный в эксперименте со спектрографом OSIRIS на КА ODIN, рассмотрен в [68] и проиллюстрирован на рис. 16 (см. с. 46) на примере будущих наблюдений с орбиты КА «Зонд».

Координированные одновременные орбитальные (сверху) и наземные (снизу) фотометрические наблюдения и томографические реконструкции авроральных форм позволят не только обеспечить интеркалибровку бортовых и наземных авроральных имаджеров, но и, в конечном счете, уточнить результаты наблюдений и получить новые знания об авроральной электродинамике.

Заклучение

Световые кванты, излучаемые атомами, молекулами и их ионами верхней атмосферы и ионосферы переносят информацию об энергетике заряженных частиц, которые возбуждают эти компоненты при столкновениях, и о процессах, предшествующих столкновениям. Научиться получать эту информацию с орбит КА и грамотно ею пользоваться в интересах решения проблем магнитосферно-ионосферной физики является целью планируемых исследований.

Возможности экспериментальных наблюдений интенсивности авроральных эмиссий с орбиты, как локальных, так и глобальных, рассмотрены в работе. Проведен обоснованный выбор конкретных эмиссий, свойства которых можно использовать для определения энергетических характеристик высыпающихся заряженных частиц. Рассмотрены некоторые элементы экспериментально-модельной методики спектрофотометрической ионосферной диагностики с орбиты и проблемы, сопутствующие ее реализации. Рассмотрены конкретные примеры полученных с орбиты авроральных изображений и других данных в различных

геомагнитных условиях и сделан краткий обзор недавних и планируемых зарубежных экспериментов.

Представлены основные предварительные характеристики создаваемых новых отечественных широкоугольных монохроматических изображающих приборов (на основе современных ССД-детекторов и цифровых электронных технологий), как в видимой области спектра, так и в области вакуумного ультрафиолета, для проведения околоземных орбитальных высокоинформативных экспериментов, основанных на дистанционных монохроматических измерениях интенсивности аврорального свечения одновременно с измерениями плазменных характеристик в окрестностях КА. Каждый из планируемых экспериментов сам по себе позволит получать новые данные об околоземной плазменной среде, а в связи с тем, что планируемое время жизни перспективных российских КА более пяти лет, то вероятность проведения координированных объемных магнитосферно-ионосферных наблюдений (см. рис. 2, с. 37) на основе ситуационного анализа орбит [22] достаточно высока.

По сути, делается попытка создания перспективной космической лаборатории для исследований ионосферных электродинамических околоземных процессов. Учитывая, что аврора присутствует на большинстве планет солнечной системы и на многих их спутниках, автор надеется, что методический и экспериментальный опыт подготовки и проведения дистанционных исследований характеристик ионосферы Земли пригодится и для дальнейших исследований свойств магнитосфер и ионосфер других планет [69].

Литература

1. Galperin Yu. I., Gretchko G. M., Grafe A., Jahn S., Kuzmin A. K., Lehmann H. R., Mohlmann D., Muljartschik T. M. Polarlichtbeobachtungen aus dem Kosmos // *Urania*. 1982. N. 8. P. 18–23.
2. Балебанов В. М., Кузьмин А. К., Пономарев Ю. Н., Синицын В. М. О некоторых аспектах планирования геофизических экспериментов на примере фотометрических измерений с двух ИСЗ: Препринт ИКИ АН СССР. Пр-1033. М.: ИКИ АН СССР, 1985.
3. Кузьмин А. К., Чиков К. Н. Спектрофотометрическая диагностика энергетических характеристик и проводимости авроральной ионосферы с ИСЗ. 1. Методические особенности, вопросы точности, требования к характеристикам экспериментальной аппаратуры // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 3. С. 1–16.
4. Balebano V. M., Kuzmin A. K., Ponomarev Yu. N., Sinitsin V. M., Bitar B., Suleyman S. The first results on neutral Doppler temperature observations from MIR orbital station // 40th Congress of IAF. Malaga, Spain, 1989. IAF-89-178. P. 1–26.
5. Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takegama N. Initial observations of auroras by the multispectral auroral camera on board the REIMEI satellite // *Earth Planet space*. 2008. N. 60. P. 827–835.
6. Mende S. B., Heeterds H., Frey H. U., Lampton M., Geller S. P., Habraken S., Renotte E., Jamar C., Rochus P., Spann J., Fuselier S. A., Gerard J.-C., Gladstone R., Murphree S., Cogger L. L. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft: 1. System design // *Space Science Rev.* 2000. V. 91. Special iss. N. 1–2. P. 243–270.
7. Mende S. B., Heeterds H., Frey H. U., Lampton M., Geller S. P., Ariad R., Siegmund O. H. W., Trensens A. S., Spann J., Dongani H., Fuselier S. A., Magoncelli A. L., Bumala M. B., Mur-

- phree S., Trondsen T.* Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft: 2. Wideband FUV imaging // *Space Science Rev.* 2000. V. 91. Special iss. N. 1–2. P. 271–275.
8. *Mende S. B., Heeterdicks H., Frey H. U., Stock J. M., Lampton M., Geller S. P., Abiad R., Siegmund O. H. W., Habraken S., Renotte E., Jamar C., Rochus P., Jerard J.-C., Sigler R., Lauche H.* Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft: 3. Spectral imaging of Lyman- α and OI 135,6 nm // *Space Science Rev.* 2000. V. 91. Special iss. N. 1–2. P. 287–318.
9. *Rees M. H., Luckey D.* Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computation // *J. Geophysical Research.* 1974. V. 79. N. 4. P. 5181–5186.
10. *Solomon S. C.* Auroral particle transport using Monte Carlo hybrid methods // *J. Geophysical Research.* 2001. V. 106. N. A1. P. 107–116. doi: 10129/2000JA002011.
11. *Lummerzheim D., Lilensten J.* Electron transport and energy degradation in the ionosphere: evaluation of the numerical solution comparison with laboratory experiments and auroral observations // *Annales Geophysicae.* 1994. V. 12. P. 1039–1051.
12. *Galand M., Lilensten J., Kofman W., Sidje R. B.* Proton transport model in the ionosphere, 1. Multistream approach of the transport equations // *J. Geophysical Research.* 1997. V. 102. N. A10. P. 22261–22272.
13. *Strickland D. J., Jasperse J. R., Basu B.* Transport-theoretical model for the electron-proton-hydrogen atom aurora. 2. Model results // *J. Geophysical Research.* 1993. V. 98. N. A12. P. 21533–21548.
14. *Kozelov B. V., Ivanov V. E.* Monte Carlo calculation of proton-hydrogen atom transport in N₂ // *Planetary and Space Science.* 1992. V. 40. N. 11. P. 1503–1511.
15. *Gerard J.-C., Shematovich V. I., Bisikalo D. V., Lummerzheim D.* A Monte Carlo model of auroral hydrogen emission line profiles // *Annales Geophysicae.* 2005. V. 23. P. 1473–1480.
16. *Peticolas L., Lummerzheim D.* Time-dependent transport of field-aligned bursts of electrons in flickering aurora // *J. Geophysical Research.* 2000. V. 106. N. A6. P. 12895–12906.
17. *Basu B., Jasperse J. R., Strickland D. J., Jr. Daniell R. E.* Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora. 1. Theory // *J. Geophysical Research.* 1993. V. 98. N. A12. P. 21517–21532.
18. *Jaspers J. R., Basu B., Lund E. J., Grossbard N.* Anomalous momentum and energy transfer rates for electrostatic ion-cyclotron turbulence in downward auroral-current regions of the Earth's magnetosphere. III // *Physics of Plasmas.* 2010. V. 17. Iss. 6. P. 062903. doi: 10.1063/1.3443711.
19. *Frey H. U., Amm O., Chaston C. C., Fu S., Haerendel G., Juusola L., Karlsson T., Lanchester B., Nakamura R., Ostgaard N., Sakanai T., Seran E., Whiter D., Weygand J. Asamura K., Hirahara M.* Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc. // *J. Geophysical Research.* 2010. V. 115. P. A10209. doi:10.1029/2010JA015537.
20. *Trondsen T. S.* High spatial and temporal resolution auroral imaging: Ph. D. Dissertation. Univ. Tromso. Tromso, 1998.
21. *Прохоренко В. И., Назиров П. П., Зеленый Л. М.* Ситуационный анализ при долгосрочном планировании космических экспериментов // *Космич. исслед.* 1998. Т. 36. № 6. С. 648–659.
22. *Paschmann G., Haaland S., Treumann R.* (Eds.) Auroral plasma physics // *Space Science Rev.* 2002. V. 103. N. 1–4. P. 1–485.
23. *Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Temerin M., Peria W., Mozes F. S., Klumpar D. M., Shelly E. G., Peterson W. K., Mobius E., Elphic R., Strangeway R., Cattel C. A., Pfaff R.* Fast observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating // *Geophysical Research Letters.* 1998. V. 25. P. 2017–2020.
24. *Marklund G. T.* On the ionospheric coupling of auroral electric fields // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 2009. V. 16. P. 365–372.

25. Chaston C. C., Salem C., Bonnel J. W., Carlson C. W., Ergun R. E., Strangeway R. J., McFadden J. P. The turbulent Alfvénic aurora // *Physical Review Letters*. 2008. V. 100. P. 175003.
26. Chaston C. C., Peticolas L. M., Bonnel J. W., Carlson C. W., Ergun R. E., McFadden J. P., Strangeway R. J. Width and brightness of auroral arcs driven by inertial Alfvén waves // *J. Geophysical Research*. 2003. V. 108. N. A2. P. 1091. doi: 10.1029/2001JA007537.
27. Dashkevich Zh. V., Ivanov V. E., Khudukon B. Z. Features of stable diffuse arcs observed by means of auroral tomography // *Annales Geophysicae*. 2007. V. 25. P. 1131–1139.
28. Lummerzheim D., Galand M., Kubota M. Optical emissions from proton aurora: Proc. of Atmospheric studies by optical methods. Sodankylä Geophysical Observatory Publications, 2003. P. 1–5.
29. Lummerzheim D., Galand M., Semeter J., Mendillo M. J., Rees M. H., Rich F. J. Emission of OI (630 nm) in proton aurora // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. N. A1. P. 141–148.
30. Edgar B. C., Porter H. S., Green A. E. S. Proton energy deposition in molecular and atomic oxygen and applications to the polar cap // *Planetary and Space Science*. 1975. V. 23. N. 5. P. 787–804.
31. Rees M. H., Lummerzheim D., Roble R. G. Auroral energy deposition rate, characteristic electron energy, and ionospheric parameters derived from Dynamics Explorer 1 images // *J. Geophysical Research*. 1988. V. 93. N. A11. P. 12,841–12,860. doi: 10.1029/JA093iA11p12841.
32. Kuzmin A. K., Chikov K. N. Perspective panoramic auroral imager and its opportunities for tomographic mapping and diagnostics of ionospheric characteristics from satellite // *Advances in Space Research*. 2003. V. 31. N. 5. P. 1321–1326.
33. Abreu V. J., Hays P. B. Parallax and atmospheric scattering effects on the inversion of satellite auroral observations // *Applied Optics*. 1981. V. 20. N. 13. P. 2203–2209.
34. Murphree J. S., Anger C. D. An empirical method for determining albedo contribution to satellite photometer data // *Remote Sensing of Environment*. 1980. V. 9. P. 183–187.
35. Кузьмин А. К. Эффект влияния отражения и рассеяния света земной поверхностью на характеристики профилей интенсивности полярных сияний на примерах данных со спутников «Ореол-3» и «ИК-Болгария-1300»: Препринт ИКИ АН СССР. Пр-1552. М.: ИКИ АН СССР, 1989.
36. Napke B. W. A theoretical photometric function for Lunar surface // *J. Geophysical Research*. 1963. V. 8. N. 15. P. 4571–4586.
37. Galand M., Lummerzheim D. Contribution of proton precipitation to space-based aurora FUV observations // *J. Geophysical Research*. 2004. V. 109. P. A03307. doi: 10.1029/2003JA010321.
38. Young J. A., Malone C. P., Johnson P. V., Ajello J. M., Liu X., Kanik I. Lyman-Birge-Hopfield emissions from electron-impact excited N₂ // *J. Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2010. V. 43. doi: 10.1088/0953-4075/43/13/135201.
39. Dashkevich Z. V., Kozelov B. V., Ivanov V. I. Lyman-Birge-Hopfield bands in proton auroras // *Geomagnetism and Aeronomy*. Engl. Transl. 1996. V. 35. N. 6. P. 812–817.
40. Germany G. A., Spann J. F., Parks G. K., Brittnacher M. J., Elsen R., Chen L., Lummerzheim D., Rees M. H. Auroral observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI) // *Geospace Mass and Energy Flow: Results from the International Solar-Terrestrial Physics Program*. Geophysical Monograph 104 / Ed. Horwitz J. L., Gallagher D. L., Peterson W. K. Published by the American Geophysical Union, Washington, DC USA, 1998. P. 149.
41. De Jong A. D. Studies of magnetospheric convection: balanced and unbalanced: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Atmospheric and Space Sciences) in The University of Michigan, 2008.
42. Immel T., Craven J., Nicolas A. An empirical model of the OI FUV dayglow from DE-1 images // *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*. 2000. V. 62. P. 47–64.
43. Eather R. H. Auroral proton precipitation and hydrogen emissions // *Rev. Geophysics*. 1967. V. 5. P. 207–285.

44. Gerard J.-C., Hubert B., Bisikalo D.V., Shematovich V.I. A model of the Lyman- α line profile in the proton aurora // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. N. A7. P. 15795–15805.
45. Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Evans D.S. Electron and proton excitation of the FUV-aurora: Simultaneous IMAGE and NOAA observations // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. N. A11. P. 1347. doi: 10.1029/2001JA009233, 2002.
46. Haaland S., Kronberg E.A., Daly P.W., Franz M., Degener L., Georgescu E., Dandouras I. Spectral characteristics of protons in the Earth's plasmashet: statistical results from Cluster CIS and RAPID // Annales Geophysicae. 2010. V. 28. P. 1483–1498.
47. Mende S.B., Frey H.U., Lampton M., Gerard J.-C., Hubert B., Fuselier S., Spann J., Gladstone R., Burch J.L. Global observations of proton and electron auroras in a substorm // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. N. 6. P. 1139–1142.
48. Habraken S., Renotte E., Rochus P., Defise J.-M., Jamar C., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., Munhoven S. The IMAGE Mission (NASA) design, test and results from the far-UV spectrographic imaging // Space Sciences. 2001. P. 1–16.
49. Hubert B., Gerard J.-C., Fuselier S.A., Mende S.B., Burch J.L. Proton precipitation during transpolar auroral events: Observations with IMAGE-FUV imagers // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. N. A06204. doi: 10.1029/2003JA010136.
50. Robertson S.C., Lanchester B.S., Galand M., Lummerzheim D., Stockton-Chalk A.B., Aylward A.D., Furniss I., Baumgardner J. First ground-based optical analysis of H β Doppler profiles close to local noon in the cusp // Annales Geophysicae. 2006. V. 24. P. 1–10.
51. Galand M., Richmond A.D. Ionospheric electrical conductances produced by auroral proton precipitation // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. N. A1. P. 117–125.
52. Galand M., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. Response of the upper atmosphere to auroral protons // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. N. A1. P. 127–139.
53. Germany G.A., Torr M.R., Torr D.G., Richards P.G., John S. Determination of ionospheric conductivities from FUV auroral emissions // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. N. A12. P. 23297–23305.
54. Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., Mende S.B. Global auroral conductance distribution due to electron and proton precipitation from IMAGE FUV observations // Annales Geophysicae. 2004. V. 22. P. 1595–1611.
55. Watermann J., Bust G., Thayer J.P., Neubert T., Coker C. Mapping plasma structures in the high-latitude ionosphere using beacon satellite, incoherent scatter radar and ground-based magnetometer observations // Annales Geophysicae. 2002. V. 45. N. 1. P. 177–189.
56. Popov V.A., Papitashvili V.O., Watermann J.F. Modeling of equivalent ionospheric currents from meridian magnetometer chain data // Earth Planet Space. 2001. V. 53. P. 129–137.
57. Yau A.W., James H.G., Bernhardt P.A., Cogger L.L., Enno G.A., Hayakawa M., Howarth A., King E.P., Knudsen D.J., Langley R.B., Rankin R., Hum R.H., Wallis D.D., White A. The Canadian enhanced polar outflow probe (e-POP) mission: current status and planned observations and data distribution // Data Science J. 2009. V. 8. P. s38–s44.
58. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry. 1. Mathematical structure // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. N. A8. doi: 10.129/2001JA000219.
59. Ostgaard N., Mende S.B., Frey H.U., Frank L.A., Sigwarth J.B. Observations of non-conjugate theta aurora // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. N. 21. P. 2125. doi: 10.1029/2003GL017914.
60. Asmus V.V., Dyadyuchenko V.N., Nosenko Y.I., Polishchuk G.M., Selin V.A. A highly elliptical orbit space system for hydrometeorological monitoring of the Arctic region // Bul. World Meteorological Organization. 2007. V. 56. N. 4. P. 293–296.
61. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. № 11. С. 1147–1177.

62. *Hall J.-O.* Interaction between electromagnetic waves and localized plasma oscillations: Ph. D. Dissertation. Upsala Univ. 2004.
63. *Kalender W.* Computed tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications. Munich: Publicis MCD Verlag, 2000.
64. *Defrise M., De Mol C.* A regularized iterative algorithm for limited-angle inverse Radon transform // *J. Modern Optics*. 1983. V. 30. Iss. 4. P. 403–408.
65. *Gustavsson B.* Three dimensional imaging of aurora and airglow. Ph. D. Thesis. Swedish Inst. of Space Physics, Kiruna, Sweden. 2000. ISBN 91-7191-878-7.
66. *Frey H. U., Frey S., Larson D., Nygren T., Semeter J.* Tomographic methods for magnetospheric applications // *Science Closure and Enabling Technologies for Constallation class missions* / Ed. V. Angelopoulos, P. V. Panetta. UC Berkeley, Calif., 1998. P. 72–77.
67. *Aso T., Ejiri M., Urashima A., Miyaoka H., Steen A., Brandstrom U., Gustavsson B.* First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March, 1995 // *Earth Planet Space*. 1998. V. 50. P. 81–86.
68. *Degenstein D. A., Llewellyn E. J., Lloyd N. D.* Volume emission rate tomography from a satellite platform // *Applied Optics*. 2003. V. 42. N. 8. P. 1441–1450.
69. *Marklund G.* Auroral processes in Solar System. JSPS Colloquium, KVA, 10–11 Mar. 2009.
70. *Bernhardt P., Siefring C., Yau A., James H. G.* Space based instrumentation for future detection of artificial ULF/ELF/VLF waves and their effects using the Canadian sponsored enhanced polar outflow project (e-POP) satellite // PARS-2 workshop “Second workshop of Novel Methods of Excitation of ULF/ELF/VLF to improve efficiency and availability”. UCLA Conference Center at Lake Arrowhead, 03–06 Nov., 2002.
71. *Young J. A., Malone C. P., Johnson P. V., Ajello J. M., Liu X., Kanik I.* Lyman-Birge-Hopfield emissions from electron-impact excited N₂ // *Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2010. V. 43. doi: 10.1088/0953-4075/43/13/13520.
72. *Steele D. P., McEwen D. J.* Electron auroral excitation efficient and intensity ratios // *J. Geophysical Research*. 1990. V. 95. V. A7. P. 10321–10336.
73. *Stampe A. M.* Electric currents in the polar magnetosphere. Ph. D. Thesis. Danish National Space Center of Copenhagen University, 2005.
74. *Galand M., Richmond A. D.* Magnetic mirroring in an incident proton beam // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. N. A3. P. 4447–4455.

Таблица 1. Предварительные характеристики орбит перспективных российских КА и авроральных изображающих приборов

Характеристики	Космический аппарат		
	«Зонд»	«Метеор-МП»	«Электро-ВО»
Высота орбиты, км	Круг ~650	Круг ~830	~40 000...2000
Плоскость	Терминатор	20...02 ЛТ	
Наклонение к плоскости экватора i , град	~97,9	~97,8	~63
Период витка	~98 мин	~102 мин	~12 ч
	Прибор		
	«Летиция»	«Авровизор-ВИС/МП»	«Авровизор-ВУФ/ВО»
Направление оси поля зрения	30° от ($-Z$) в плоскости $Y-Z$ в сторону неосвещенной полусферы	Надир (ось $-Z$ КА)	Надир (ось $+X$ КА)
Измеряемые длины волн, нм	λ630; 427,8	λ630; 427,8; 486,1	λ121,6; 135,6; 135...160; 160...180
Угол поля зрения 2ω , град	30	30	18 (изображающая камера); 15 (спектрографический имаджер)
Ω , ср	~0,0341	~0,0341	~0,07609
Порог чувствительности P	10	10	20
Время экспозиции, с	0,1...1	0,1...1	1...45
Скорость смаза изображения, км/с	7	7	
Максимальная интенсивность, кФ	20	20	10
Пространственное разрешение: угл. с км/пикс (на $h = 100$ км)	105 0,28...0,29	105 0,38...0,4	64 12 (изображающая камера); 50 (спектрографический имаджер)
Детектор CCD/ICCD, пиксел	CCD 1024×1024	CCD 1024×1024	ICCD 1024×1024
Максимальная информативность (без сжатия), Гбит: за 1 виток за 1 сутки	46 690	61 915	100 200
Масса, кг	6 (моноблок)	10 (моноблок)	8 + 8 (изображающая камера) + 19 (спектрографический имаджер) = 35
Мощность потребления с учетом охлаждения CCD, Вт	20	25	Σ26

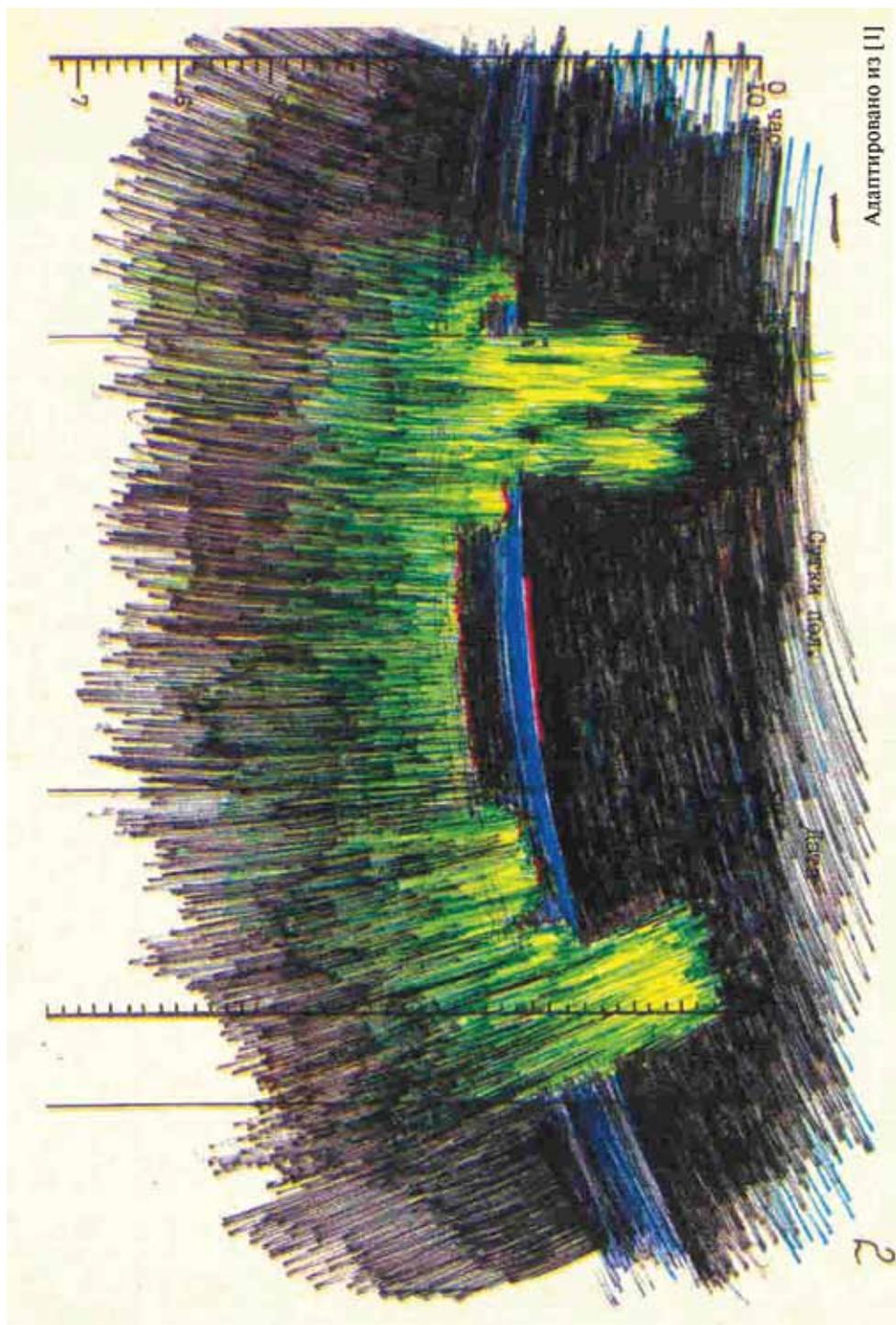


Рис. 1

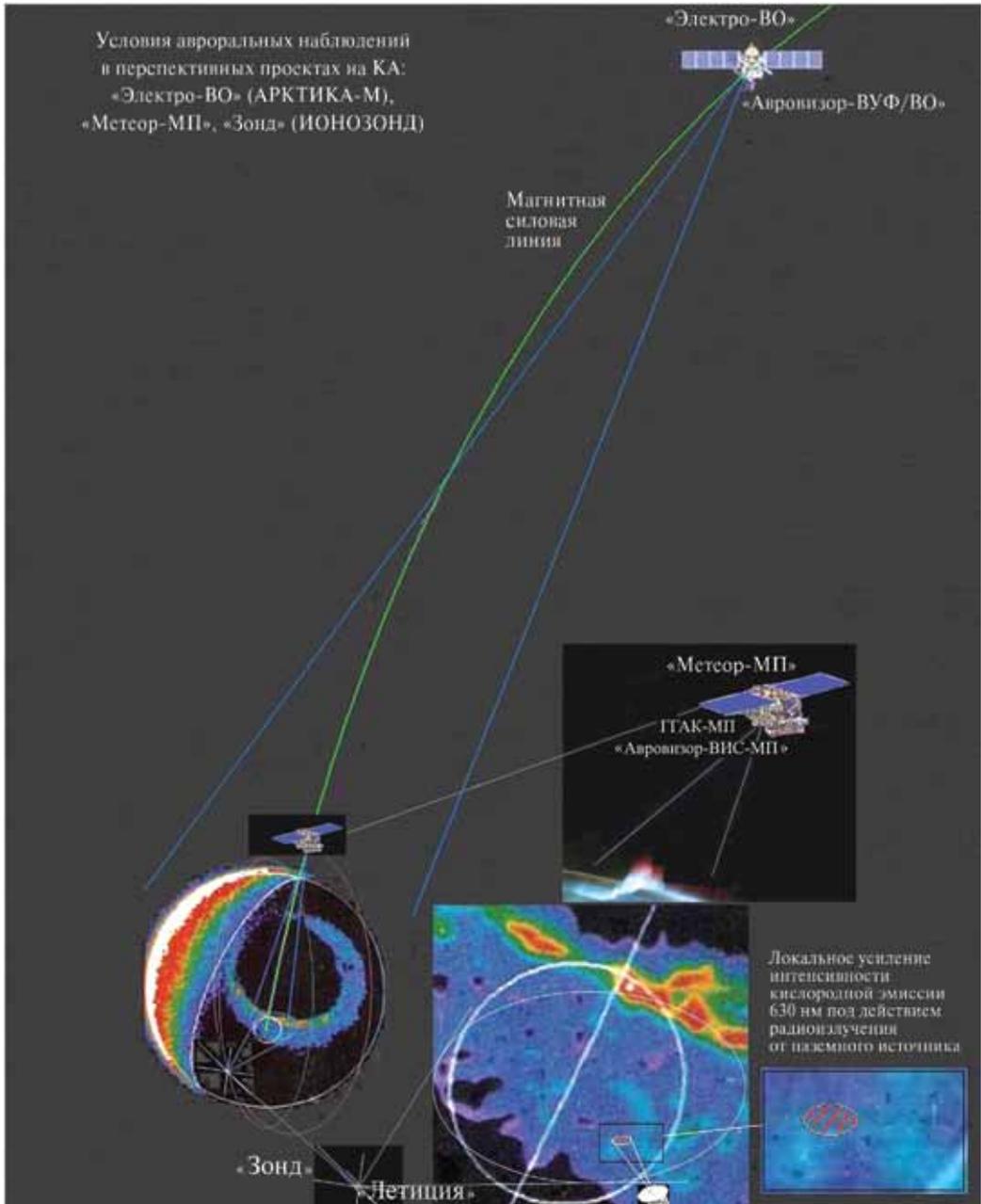


Рис. 2

Пространственная шкала авроральных форм
Адаптировано из [http://www.spaceweather.com/aurora/images/2003/01apr03/dmsp.jpg]

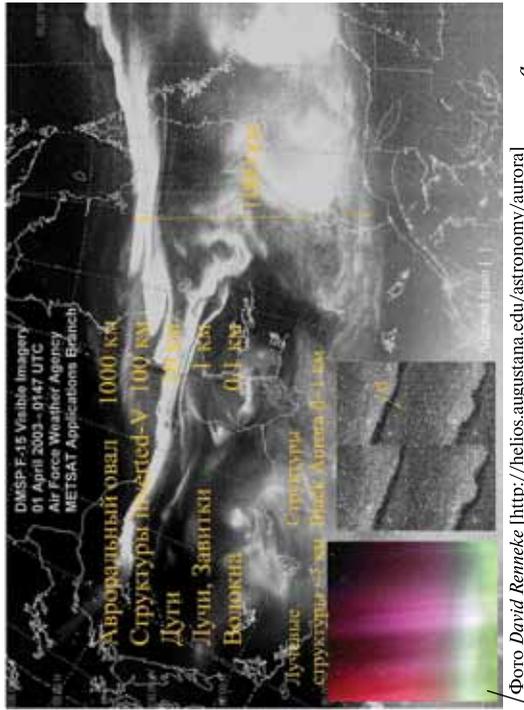


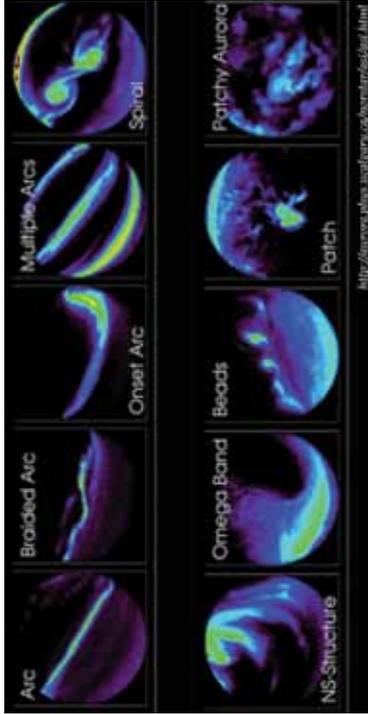
Фото David Rennieke [http://helios.augustana.edu/astromony/aurora/] a

Таблица 2. Пространственные масштабы и частотные диапазоны авроральных электродинамических явлений и процессов (Адаптировано из [21, Tabl. 4-1])

Линейный масштаб	Явления (масштабы)	Процессы
100...1000 км	Region 1, 2 current systems	Large-scale coupling
10...100 км	Inverted-V arc systems	Downward electron acceleration
10...30 км	Reverse arc systems	Upward electron acceleration
0,1...1 км	Narrow arcs, filaments, dark aurora	Ionospheric-magnetospheric coupling
10 м	Ion-gyroradius scales	Diffusive processes
1 м	Debye-length scales	Non-neutrality, HF-waves
Частотный диапазон		
0...10 Гц	DC	Convection, parallel acceleration
0,001...10 Гц	MHD, Alfvén waves	Ionospheric-magnetospheric coupling
1...1000 Гц	ELF	Ion heating
1 кГц – 1 МГц	VLF	Whistler hiss
1...10 МГц	MHz	Langmuir & UH waves
Выше 300 кГц	AKR	Radiation

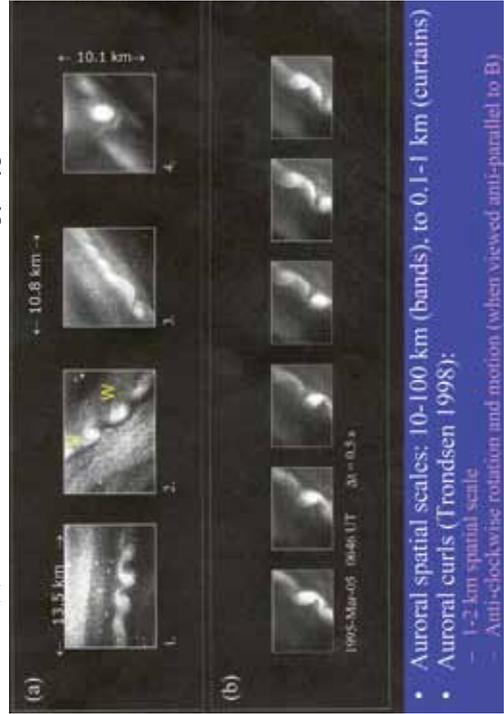
Рис. 3

Дискретные авроральные формы



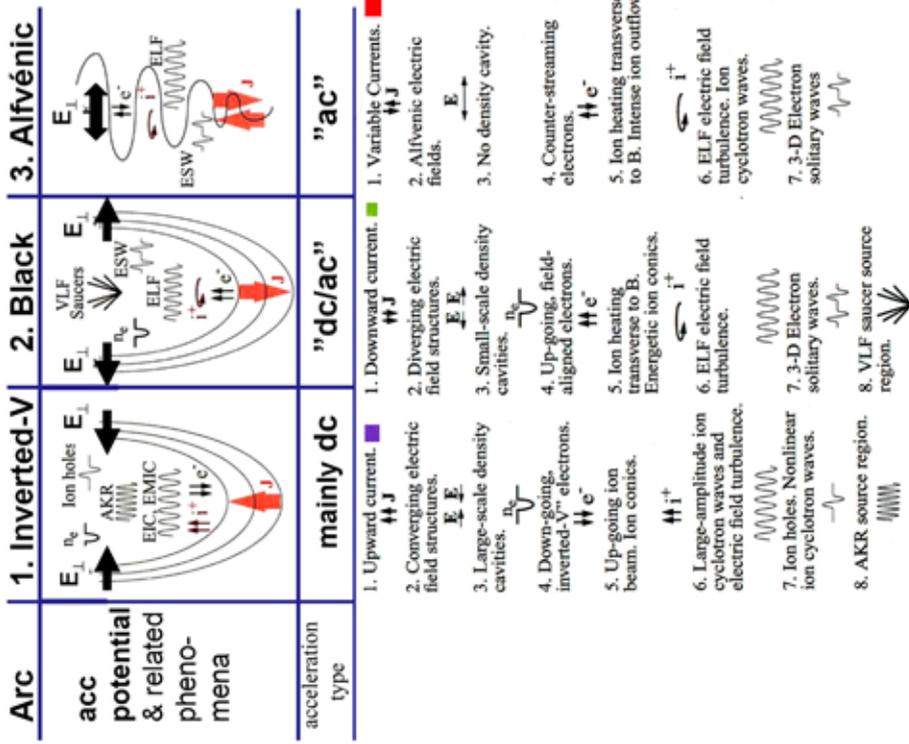
б

Динамические мелкомасштабные структуры

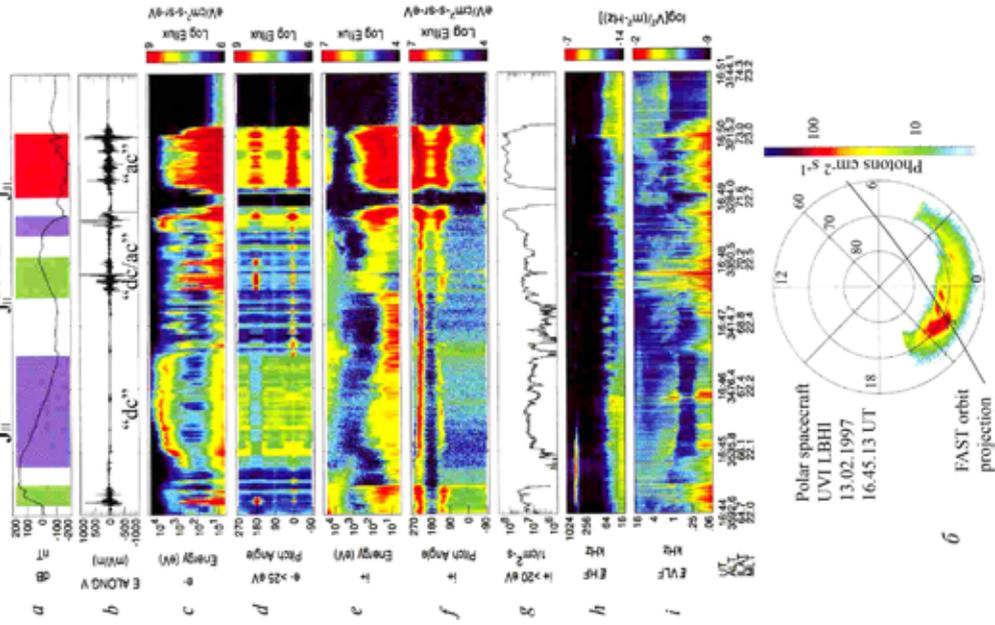


б Адаптировано из [20, Fig. 10.1]

Адаптировано из [21, Fig. 4.1]



Адаптировано из [21, Fig. 4.2]

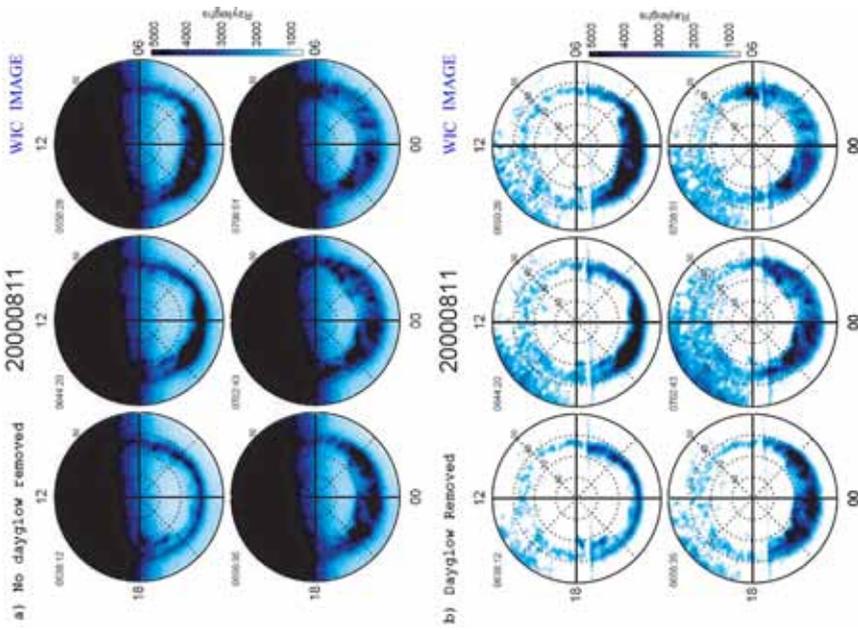


a

b

Рис. 4

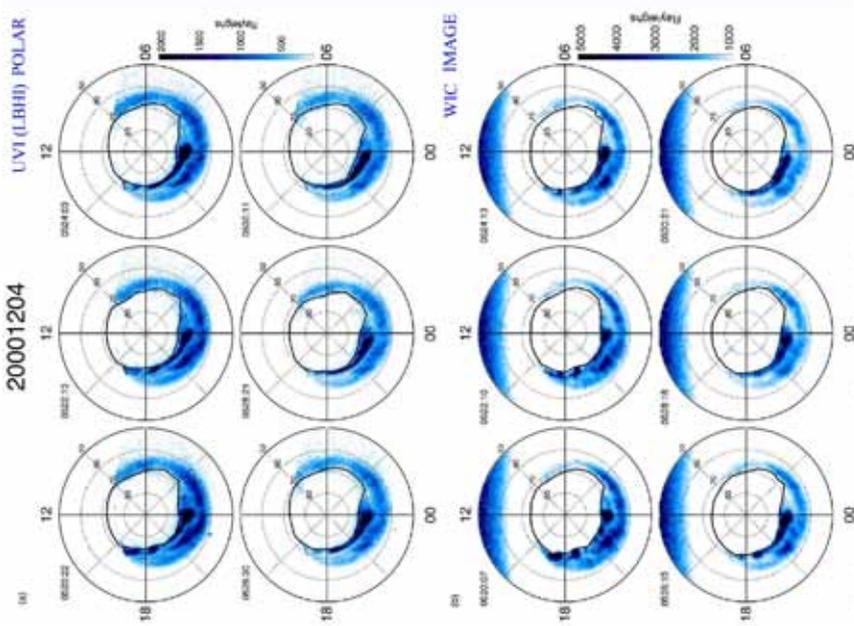
Пример коррекции ВУФ-изображений на интенсивность Dayglow.
Коррекция сделана в работе [41] по методике из работы [42]



(a) plot of the aurora on August 11, 2000 with out dayglow removed.
(b) The same plots as (a) with dayglow removed.

Рис. 7 (адаптировано из [41, Fig. 2.7])

Сравнение ВУФ-изображений, полученных 04.12.2000
с КА Polar (UVI LBHI) и с КА IMAGE (WIC)



(a) plot of the aurora on December 04, 2000 taken by Polar UVI LBHI.
(b) The same plots as (a) but taken with IMAGE FUV WIC.

Рис. 8 (адаптировано из [41, Fig. 2.3])

Динамика электронного (оранжевый) и протонного (синий) аврорального овала во время малой суббури 28 июня 2000 г. (IMAGE) Адаптировано из [47, Fig. 1]

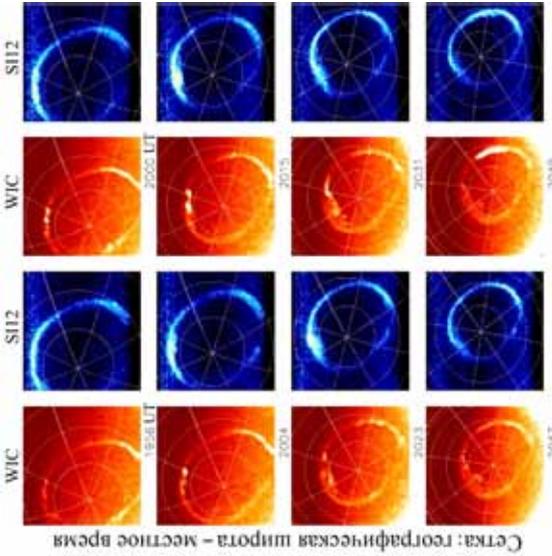


Рис. 9

Тонкая структура видна только в электронном авроральном овале (WIC и S113) Адаптировано из [48, Fig. 9]

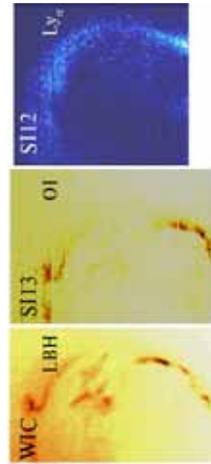
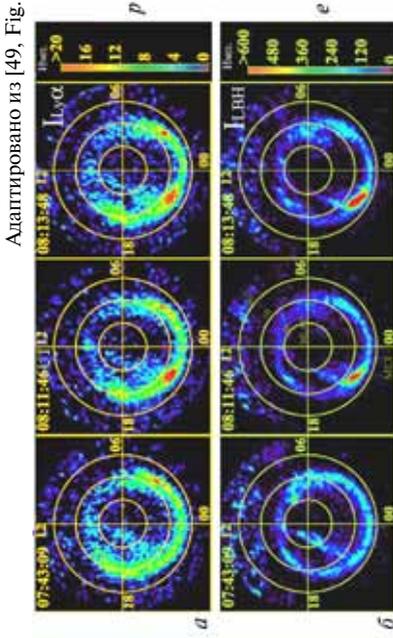


Рис. 10

Данные IMAGE за 7 июня 2000 г. Тонкая структура в ВУФ-изображении электронного аврорального овала по данным камеры WIC и S113 (левая и средняя панели) и ее отсутствие в ВУФ-изображении протонного овала по данным S112. Тонкая структура электронного овала вероятно образована благодаря inverted-Y высыпаниям электронов

IMAGE

ВУФ-изображения протонного (а) и электронного (б) аврорального овала и трансполлярной дуги 5 ноября 2000 г. в условиях северного ММП по данным спектрографического имажера S112 (Ly_{α}) и изображающей камеры WIC (LBH) Адаптировано из [49, Fig. 1 и 3]



Распределение потока энергии протонов (е) и потока энергии электронов (з) по данным представленных выше изображений. В распределениях F_e вычтен вклад протонов в интенсивность линий LBH

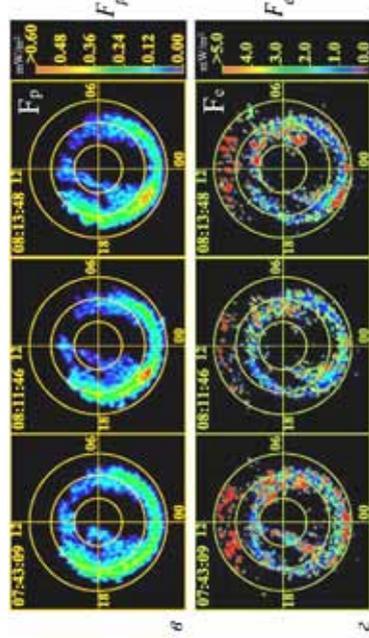


Рис. 11

Прогонный авральный овал, касп и характеристики линий Ly_{α} и H_{β}

Таблица 4

Table 1 from [44]. Characteristics of the Ly- α Line Profiles for a $1 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ Proton Precipitation

Energy, keV	Distribution	Emission Rate, keR	Altitude of Emission, km	Peak Red Shift, Å	Blur Wing Fraction
1	monochromatic*	5.7	175	1.13	0.01
8	monochromatic	4.0	133	0.9	0.07
40	monochromatic	1.2	113	0.46	0.16
1	Maxwellian ^b	5.4	148	1.05	0.03
8	Maxwellian	2.4	126	0.69	0.12
40	Maxwellian	0.7	105	0.45	0.19
8	kappa ^c	1.6	119	0.57	0.13
8	Maxwellian ^d	2.3	126	1.26	0.01
8	Maxwellian ^e	1.3	119	1.32	0.00
8	midnight	2.4	126	0.85	0.10
-	cusp	5.8	156	1.15	0.04

* Monochromatic protons with an isotropic (cos θ) pitch angle distribution
 b Isotropic Maxwellian energy distribution.
 c Isotropic kappa distribution characterized by $E_0 = 8 \text{ keV}$, $\kappa = 4$.
 d Same as Maxwellian distribution at 8 keV except forward scattering approximation.
 e Same as Maxwellian distribution at 8 keV except pitch angles restricted to $\pm 5^\circ$.

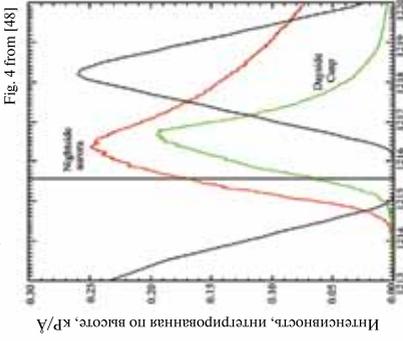


Fig. 4 from [48]

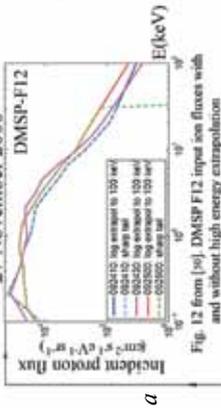


Fig. 12 from [50]. DMSP F12 input ion fluxes with and without high energy extrapolation.

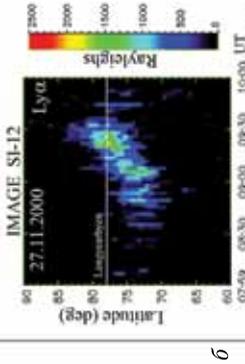


Fig. 8 from [50]. Time history of IMAGE Ly- α intensity at longitude of Longyearbyen ($16 \pm 1^\circ$ averaged)

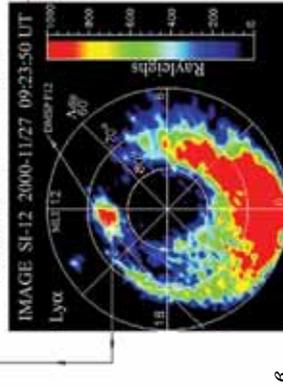


Fig. 9 from [50]. IMAGE Ly- α data at 09:23:50 UT plotted in magnetic latitude and magnetic local time coordinates. The DMSP-F12 footprint is drawn with a thin line and its position at this time is marked with an asterisk.

Длина волны, Å
 Полосы пропускания спектрографического ВУФ-имажера SPI2 (IMAGE) показаны черными сплошными линиями. Смоделированные для максвелловского распределения высвечивающихся протонов доплеровски сдвинутые профили водородной линии Ly_{α} в дневном каспе показаны **зеленым** цветом, а в ночной авральной области — **красным**. Вертикальная черная сплошная линия показывает положение линии Ly_{α} без доплеровского сдвига (холодная геокоорона)

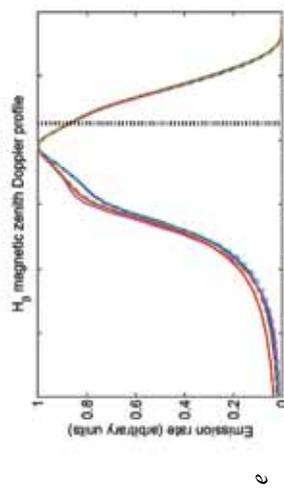


Fig. 13 from [50]. Doppler-shifted H_{β} profiles along the magnetic zenith resulting from the H- α H model driven by the DMSP input spectra (top left).

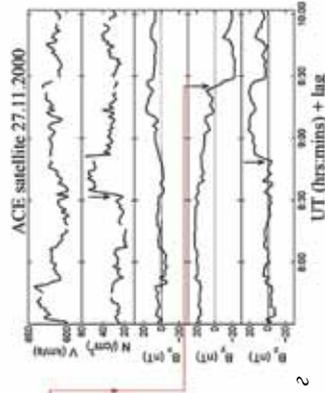


Fig. 7 from [50]. Data from ACE satellite, lagged by 41 min. Arrows mark the times of significant changes that result in observed effects in the ionosphere.

Рис. 12

Динамика интегрированных по высоте поперечных проводимостей полярной ионосферы при спокойных и возмущенных геомагнитных условиях, рассчитанных по данным авроральных ВУФ-изображений, полученных с КА IMAGE

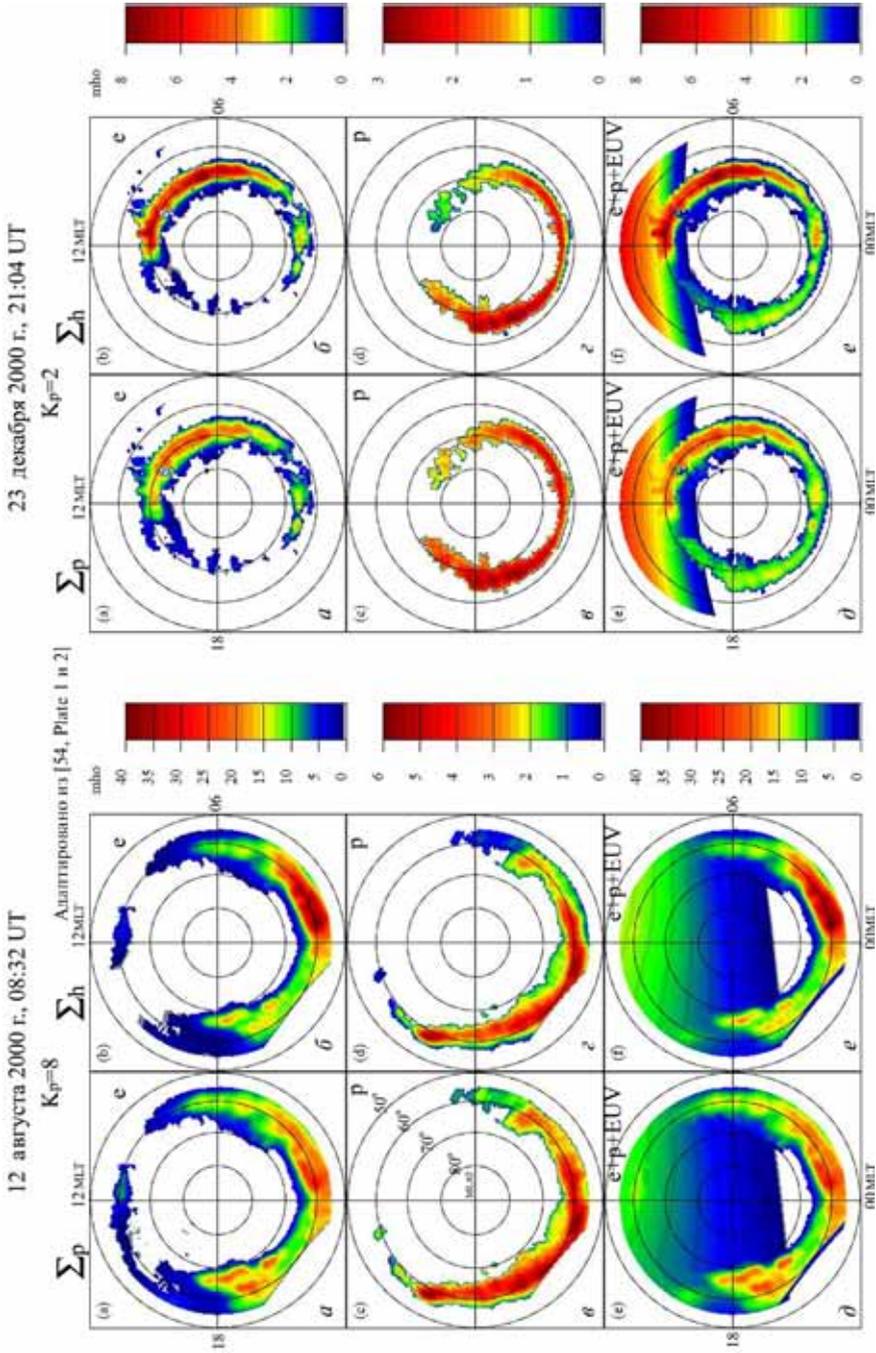


Рис. 13

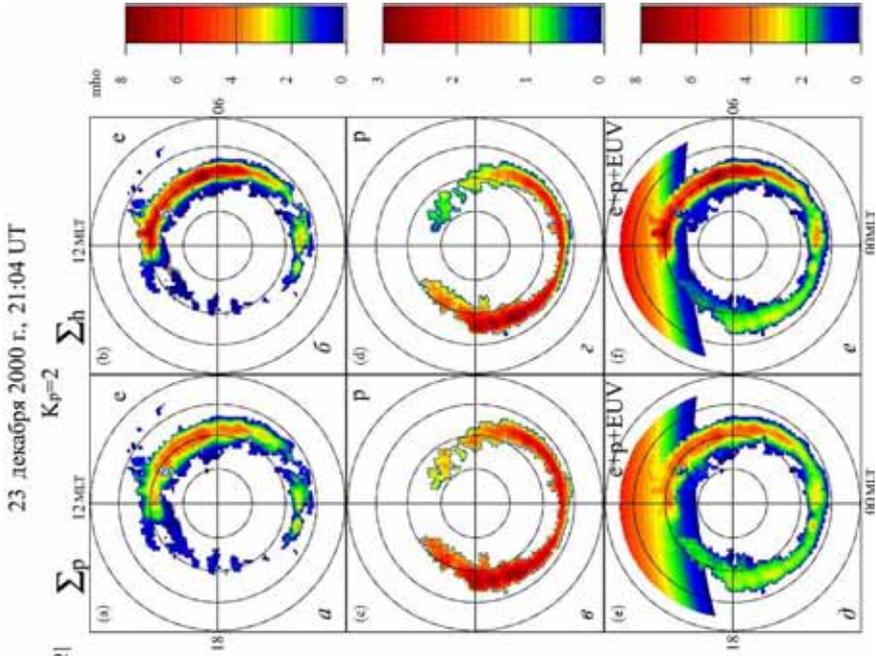


Рис. 14

Геометрия лимбовых наблюдений авроральных эмиссий с КА «Зонд» (имаджер «Летиция») в период зимнего солнцестояния (22 декабря)

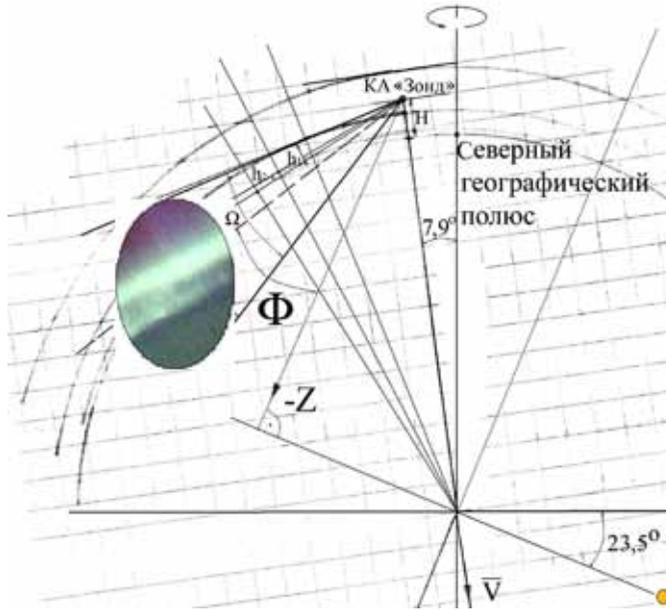


Рис. 15

Возможность томографической реконструкции лимбовых изображений в эксперименте ЛЕТИЦИЯ

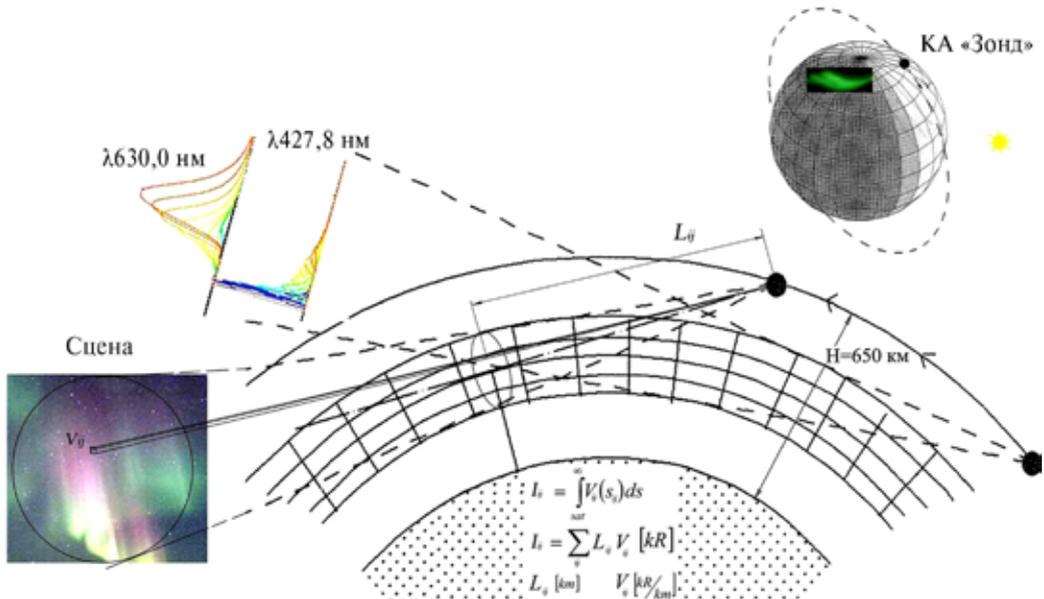


Рис. 16

Условия наблюдения авроральных структур с помощью имаджера «Авроризеро-ВИС-МП» с орбиты КА «Метеор-МП»

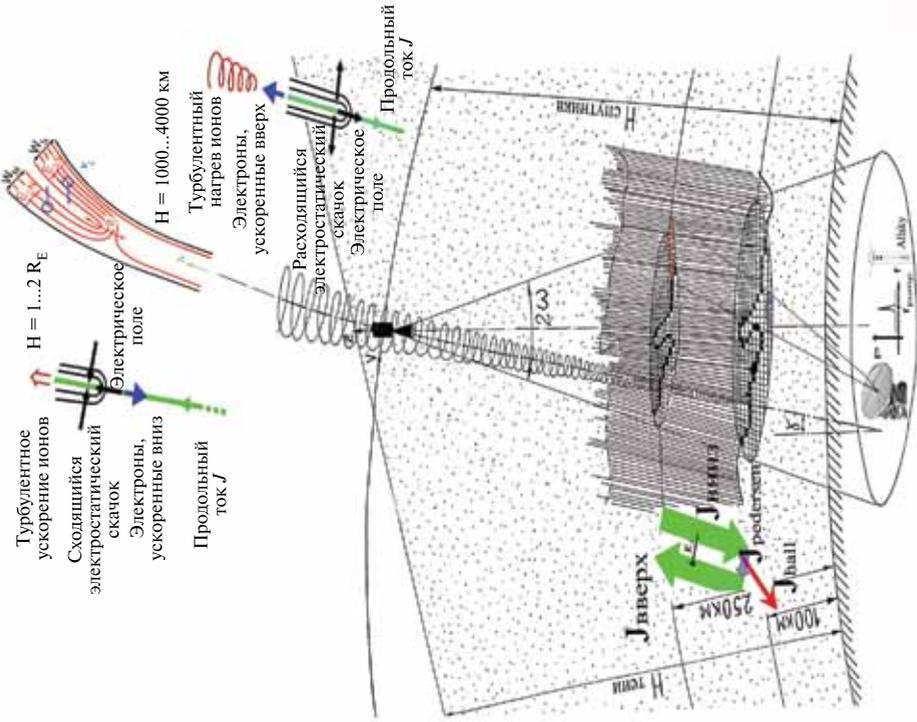


Рис. 17

Пространственно-временное сопряжение бортовых измерений характеристик распределения выпадающих электронов и протонов, градиентов магнитного поля и монохроматических изображений авроральных эмиссий

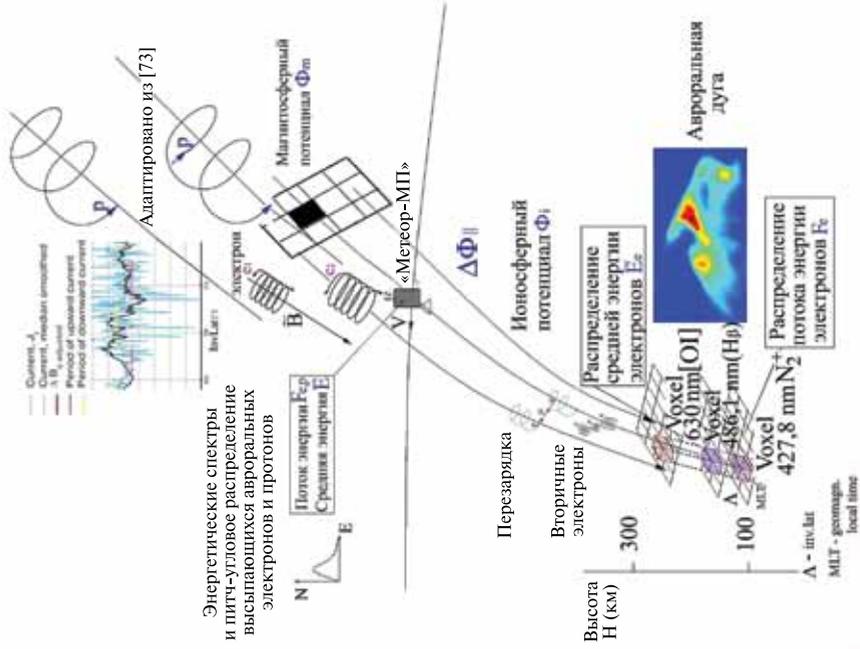
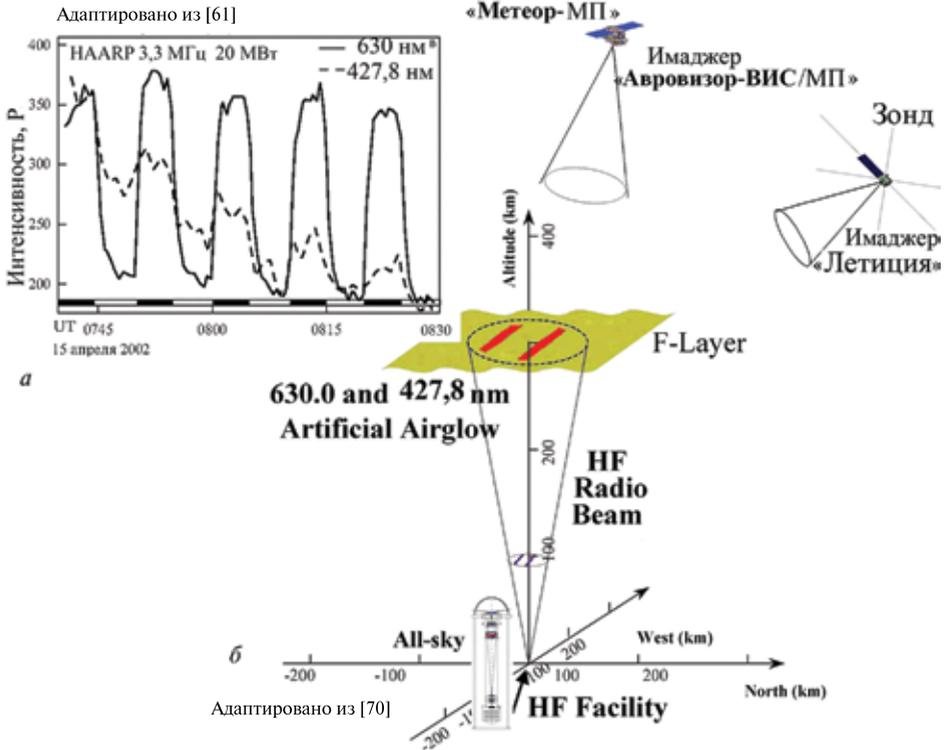


Рис. 18

Локальные градиенты интенсивности над зоной работы мощных источников ВЧ-излучения и возможность их наблюдения с орбит КА «Метеор-МП» и «Зонд»



Нагрев холодных ионосферных электронов в верхнегибридном и ленгмюровском резонансе

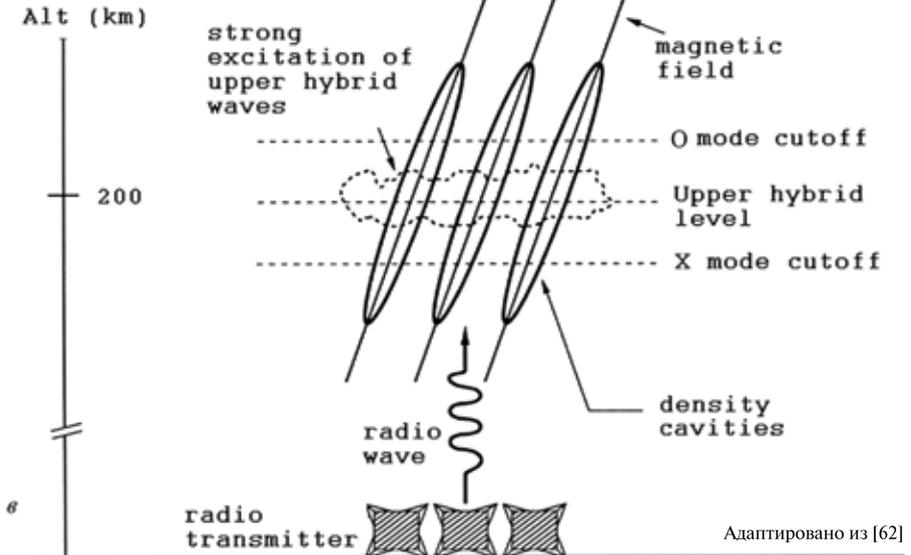
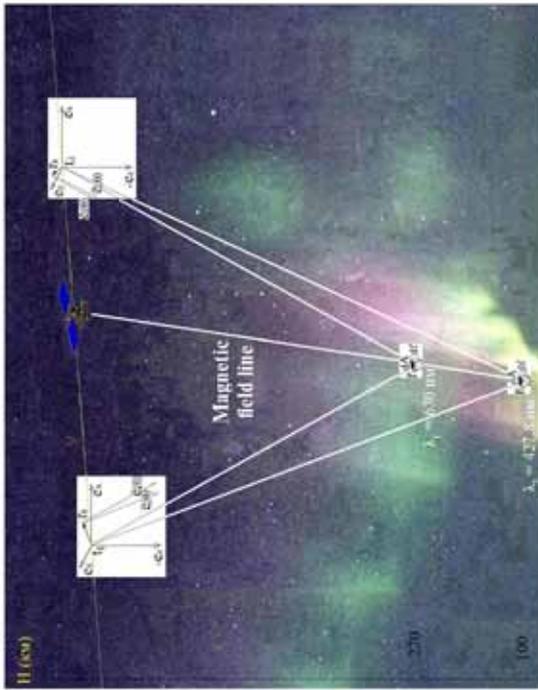


Рис. 19

Условия для авральной томографии при наблюдениях с орбит КА «Метеор-МП» и «Зонд»



Построение объемного изображения авральной структуры по данным серии плоских изображений, полученных с орбиты в течение ~1,5 мин под разными азимутальными углами (по аналогии с медицинской томографией)

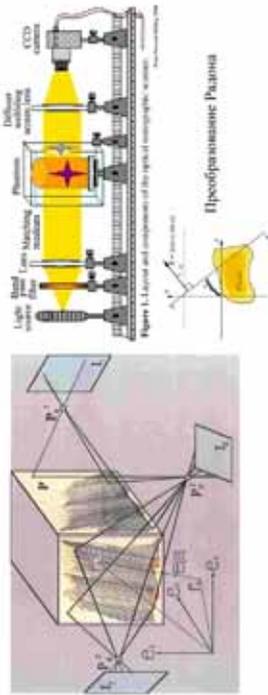


Рис. 20

Последовательность экспозиций авральных изображений с орбиты КА Метеор-МП (H=830 км)
Имаджер Авровизор-ВИС ($\lambda 630, \lambda 427,8$ и $\lambda 486,1$ нм)
 Каждый элемент сцены наблюдается многократно.
 Проекция магнитной силовой линии (□), на которой находится КА, всегда есть в поле изображения.
 Высота поля изображения для $\lambda 427,8$ нм $h=105$ км.
 t_0 t_0+1 мин t_0+2 мин

57 сек

Image 1 **Image 58** **Image 115**

402 x 402 км
400 м/пиксел

Время экспозиции ~0,1-0,3 с
Частота получения изображений 1/с
Скорость КА ~ 7 км/с

Design adapted from www.risc.ac.uk/cv.cdu.nv/FISFES/Presentation/Yau-FISFES-2006-11.pdf

Рис. 21

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32
Подписано к печати 12.08.2011

Заказ 2252

Формат 70×100/16

Тираж 75

3,9 усл.-печ. л.